



الهيئة العامة للطرق
Roads General Authority

كـــود الطـرق السعودي

٢٠٢٣
الإصدار الأول

تصميم الطرق والجسور والأنفاق
كود الطرق السعودي ٣٠٨ - تصميم الرصف

رؤيـــة VISION 2030
المملكة العربية السعودية
KINGDOM OF SAUDI ARABIA


كـــود الطـرق السعـودي
SAUDI HIGHWAY CODE

القائمة الرئيسة لكود الطرق السعودي			
م	المحور	الكود	العنوان
١	مقدمة	كود الطرق السعودي ١٠١	عام
٢	التخطيط والدراسات الأولية	كود الطرق السعودي ٢٠١	عملية التخطيط
٣		كود الطرق السعودي ٢٠٢	الأعمال المساحية ورسم الخرائط
٤		كود الطرق السعودي ٢٠٣	الدراسات الأولية
٥	تصميم الطرق والجسور والأنفاق	كود الطرق السعودي ٣٠١	التصميم الهندسي للطرق
٦		كود الطرق السعودي ٣٠٢	تصميم مرافق الطرق ومنافعها - الهيدرولوجيا والتصميم الهيدروليكي
٧		كود الطرق السعودي ٣٠٣	تصميم مرافق الطرق ومنافعها - مناطق الاستراحة، ومحطات فحص الشاحنات، ومواقف السيارات والمرائب
٨		كود الطرق السعودي ٣٠٤	تصميم مرافق الطرق ومنافعها - تصميم أنظمة السلامة الخاملة
٩		كود الطرق السعودي ٣٠٥	تصميم مرافق الطرق ومنافعها - تصميم منطقة أعمال الطرق
١٠		كود الطرق السعودي ٣٠٦	تصميم مرافق الطرق ومنافعها - المنافع العامة، وإنارة الطرق والشوارع، وأجهزة التحكم والمراقبة
١١		كود الطرق السعودي ٣٠٧	تصميم مرافق الطرق ومنافعها - زراعة المسطحات الخضراء، والإعلانات الخارجية
١٢		كود الطرق السعودي ٣٠٨	تصميم الرصف
١٣		كود الطرق السعودي ٣٠٩	مواصفات المواد والاختبارات القياسية
١٤		كود الطرق السعودي ٣١٠	تصميم الجسور والأنفاق
١٥	إنشاء الطرق والجسور والأنفاق	كود الطرق السعودي ٤٠١	إنشاء الطرق
١٦		كود الطرق السعودي ٤٠٢	إنشاء الجسور والانفاق
١٧		كود الطرق السعودي ٤٠٣	إنشاء مرافق الطرق
١٨	نظم صيانة الطرق والجسور والأنفاق وإدارتها	كود الطرق السعودي ٥٠١	نظم إدارة صيانة الرصف
١٩		كود الطرق السعودي ٥٠٢	نظم صيانة الجسور والأنفاق وإدارتها
٢٠		كود الطرق السعودي ٥٠٣	نظم صيانة مرافق الطرق وإدارتها
٢١	هندسة المرور و سلامة الطرق	كود الطرق السعودي ٦٠١	هندسة المرور
٢٢		كود الطرق السعودي ٦٠٢	الدليل الموحد لأجهزة التحكم المروري
٢٣		كود الطرق السعودي ٦٠٣	سلامة الطرق
٢٤	الجوانب البيئية للطرق	كود الطرق السعودي ٧٠١	الجوانب البيئية للطرق
٢٥	متطلبات المركبات ذاتية القيادة	كود الطرق السعودي ٨٠١	متطلبات المركبات ذاتية القيادة

الهيئة العامة للطرق
المملكة العربية السعودية، الرياض، وادي الحياة، حي المروج-١٢٢٦٤
٠١١٨٧٤٤٤٤٤ هاتف محلي/ ٩٦٦٠١١٨٧٤٤٤٤٤+ خارج المملكة العربية السعودية

© جميع الحقوق محفوظة للهيئة العامة للطرق ١٤٤٥هـ | ٢٠٢٣م

الهيئة العامة للطرق
Roads General Authority

وزارة النقل والخدمات اللوجستية
Ministry of Transport and Logistic Services

وزارة الشؤون البلدية والقروية والإسكان
Ministry of Municipal Rural Affairs & Housing

SASO
المواصفات السعودية
Saudi Standards

وزارة البيئة والمياه والزراعة
Ministry of Environment Water & Agriculture

EXPRO
هيئة كفاءة الإنفاق والمشروعات الحكومية
Expenditure & Projects Efficiency Authority

المملكة العربية السعودية
الهيئة الملكية لجبيل وينبع
Royal Commission for Jubail and Yanbu
KINGDOM OF SAUDI ARABIA

اللجنة الوزارية للسلامة المرورية
الأمانة العامة
The Ministerial Committee of Traffic Safety
General Secretariat

المركز الوطني لسلامة الطرق
National Road Safety Center

مركز دعم هيئات التطوير
DEVELOPMENT AUTHORITIES SUPPORT CENTER

أرامكو
aramco

اللجنة التوجيهية

	معالي م. بدر بن عبدالله الدلامي **رئيس اللجنة**	
أ.د. علي بن سعيد الغامدي **مدير عام المشروع**	م. عبدالله بن عبدالرحمن الربيعة **عضو**	م. بدر بن علي الحقباني **عضو**
م. رامي بن إسماعيل جلي **عضو**	م. علي بن سعيد الغامدي **عضو**	أ. طامس بن علي الحمادي **عضو**
م. خالد بن وليد الرشيد **عضو**	م. عبدالله بن محمود كاشغري **عضو**	م. أجدل بن محمد السلمي **عضو**
م. عمر بن عبدالرحمن الضبعان **عضو**	د. خالد بن يحيى القحطاني **عضو**	م. هذلول بن حسين الهذلول **عضو**
م. عبدالله بن سليمان السليمان **عضو**	م. طارق بن زياد الشامي **عضو**	م. سالم بن جبران القحطاني **عضو**
م. نواف بن أحمد الظبياني **سكرتارية اللجنة**	م. مياسم بنت مبارك باجويبر **سكرتارية اللجنة**	

مدير عام مشروع كود الطرق السعودي

أ.د. علي بن سعيد الغامدي

اللجنة المشرفة

أ.د. علي بن سعيد الغامدي **مدير عام المشروع**	
أ.د. سعد بن عبدالرحمن القاضي **المدير الفني العام**	م. تركي بن عبدالله العمودي **المدير الفني**
م. عبدالعزيز بن علي السحيباني **المدير الإداري**	م. محمد بن فايز المنيع **عضو**

الفريق الفني

أ.د. علي بن سعيد الغامدي **مدير عام المشروع**	أ.د. سعد بن عبدالرحمن القاضي **المدير الفني العام**	م. تركي بن عبدالله العمودي **المدير الفني**
م. عثمان بن مختار محمد **عضو**	م. مياسم بنت مبارك باجويبر **عضو**	م. فيصل بن عبدالرحيم العنزي **عضو**
م. مشعل بن عبدالله باوزير **عضو**	م. إبراهيم بن حسين أبوحليقة **عضو**	م. فهد بن علي المحمود **عضو**
م. يوسف بن عبدالعزيز العمار **عضو**	م. عمر بن أسامة كبوش **عضو**	م. أوس بن عبدالمنعم بخاري **عضو**

الفريق الإداري

م. عبدالعزيز بن علي السحيباني **المدير الإداري**	م. نواف بن أحمد الظبياني **مدير التواصل**	أ. نجلاء بنت سعيد جراد **مشرف تطوير الموقع الإلكتروني**
م. فيصل بن عبدالرحيم العنزي **مشرف الترجمة**	أ. موضي بنت ابراهيم الربيشى **عضو**	أ. شوق بنت خالد الخريجي **عضو**
أ. نادر بن فياض الشراري **عضو**	أ. عبدالله بن محمد العمري **عضو**	م. عبدالله بن عبدالرحمن الملاحي **عضو**

الفريق القانوني

أ. نجود بنت عبداللطيف بدران **عضو**	أ. أحمد بن مصلح الثقفي **عضو**

اللجنة الفنية (كود الطرق السعودي ٣٠٨)

أ.د. سعد بن عبدالرحمن القاضي	أ.د. حمد بن إبراهيم العبدالوهاب	أ.د. عبدالله بن إبراهيم المنصور
رئيس	**عضو**	**عضو**

فريق تدقيق الترجمة الفني

أ.د. سعد بن عبدالرحمن القاضي	م. تركي بن عبدالله العمودي	م. فيصل بن عبدالرحيم العنزي
رئيس	**عضو**	**عضو**
م. مشعل بن عبدالله باوزير	م. عثمان بن مختار محمد	م. مياسم بنت مبارك باجويبر
عضو	**عضو**	**عضو**
م. عبدالله بن عبدالعزيز بخش	م. عبدالعزيز بن عبدالله العسكر	م. إبراهيم بن حسين أبوحليقة
عضو	**عضو**	**عضو**

فريق تدقيق الترجمة اللغوي

د. هيفاء بنت محمد الفريح	د. فاطمة بنت علي الألمعي	د. نورة بنت عبدالعزيز الشعلان
رئيس	**عضو**	**عضو**
أ.د. زاهية بنت سالم جويرو	أ. نوف بنت عيسى المالكي	
عضو	**عضو**	

جدول المحتويات

جدول المحتويات ..... أ

قائمة الأشكال ..... ز

قائمة الجداول ..... ك

١- المقدمة: ١

١-١ ملخص الأبواب: ١

١-٢ النطاق: ١

١-٣ المواصفات والأكواد المرجعية: ٢

٢- مبادئ تصميم الرصف: ٣

2-1 مكونات تصميم الرصف: ٣

٢-١-١ المرونة: ٣

٢-١-٢ الاستدامة: ٣

٢-٢ أنواع الرصفيات: ٥

٢-٢-١ الرصفيات المرنة: ٥

٢-٢-٢ الرصفيات الصلبة: ٦

٢-٢-٣ الرصفيات المركبة: ٧

٢-٣ طرق تصميم الرصف: ٧

٣- مواد الرصف: ١٢

٣-١ مواد القاعدة الترابية: ١٢

٣-١-١ أنواع القاعدة الترابية: ١٢

٣-١-٢ تحليل المنخل: ١٣

٣-١-٣ حدود أتيربيرج: ١٣

٣-١-٤ الكثافة: ١٣

٣-١-٥ حساب قوة القاعدة الترابية: ١٣

٣-١-٦ صرف مياه القاعدة الترابية: ١٤

٣-١-٧ تحسين القاعدة الترابية: ١٥

٣-١-٨ تثبيت ما تحت الأساس: ١٦

٣-١-٩ الشبكات الصناعية الأرضية (Geogrids)، والتكسيات النسيجية الأرضية (Geotextiles)، وخلايا الاحتواء الأرضية (Geocells): ١٦

٣-٢ الركام غير المترابط (المُخلخل): ١٧

٣-٢-١ الركام المستخدم في طبقات الأساس: ١٧

٣-٢-٢ الركام المستخدم مع طبقات ما تحت الأساس ١٨

٣-٢-٣ القوة: ٢٠

٣-٣ الركام المُثبّت: ٢٠

٣-٣-١ الأساس المعالج بالأسفلت: ٢٠
٣-٣-٢ طبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس المعالجة بالأسمنت: ٢٠
٣-٣-٣ طبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس المعالجة بالجير: ٢٠
٣-٣-٤ الأساس الخرساني المدموك بمدحلة (رصّاصة): ٢٠
٣-٣-٥ الأساس المسامي المعالج بالأسفلت: ٢٣
٣-٤ الركام المُعاد تدويره: ٢٣
٣-٤-١ طبقات الأساس وما تحت الأساس غير المُثبّتة: ٢٣
٣-٤-٢ طبقات الأساس وما تحت الأساس المُثبّتة: ٢٣
٣-٤-٣ مواد الخرسانة الأسفلتية: ٢٤
٣-٥ مواد الأسفلت: ٢٤
٣-٥-١ درجات الاختراق واللزوجة: ٢٤
٣-٥-٢ درجة الأداء (PG) ٢٥
٣-٥-٣ المُحسِّنات ٢٨
٣-٥-٤ اختيار المادة الرابطة ٢٩
٣-٦ مواد الخرسانة الأسفلتية ٢٩
٣-٦-١ طريقة مارشال لتصميم الخلطة ٢٩
٣-٦-٢ طريقة تصميم خلطة سوبربيف ٣٨
٣-٧ خرسانة الأسمنت البورتلاندي ٤٤
٣-٧-١ الأنواع ٤٤
٣-٧-٢ الركام ٤٤
٣-٧-٣ الماء ٤٧
٣-٧-٤ المضافات ٤٧
٣-٧-٥ معايير التصميم ٤٨
٣-٧-٦ تصميم خلطة الخرسانة ٥٠
٤- التحليل المروري: ٥٦
٤-١ المقدمة: ٥٦
٤-٢ الأحجام المرورية: ٥٦
٤-٣ تصنيف المركبات: ٥٦
٤-٤ الأوزان القصوى للمركبة والمحاور في المملكة العربية السعودية: ٥٧
٤-٥ توزيع فئات المركبات: ٦٠
٤-٦ نسبة المركبات الثقيلة: ٦١
٤-٧ معدل النمو السنوي: ٦١
٤-٨ معامل النمو: ٦١
٤-٩ معاملات مكافئة الحمل: ٦١

٤-١٠ مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) التراكمية: ٦١
٥- التصميم الإنشائي للرصف المرن: ٦٣
٥-١ الطريقة: ٦٣
٥-١-١ تصنيفات الطرق: ٦٣
٥-١-٢ المرور على الطرق: ٦٣
٥-١-٣ إطار اختيار طريقة التصميم. ٦٤
٥-٢ الطريقة التجريبية لتصميم الرصف. ٦٥
٥-٢-١ طريقة (AASHTO) التصميمية. ٦٥
٥-٢-٢ معايير التصميم. ٦٥
٥-٢-٣ العمر التصميمي. ٦٧
٥-٢-٤ الأحمال المرورية. ٦٧
٥-٢-٥ الموثوقية ٦٩
٥-٢-٦ خواص المواد. ٦٩
٥-٢-٧ صرف المياه. ٧٨
٥-٢-٨ طريقة التصميم الإنشائي. ٧٩
٥-٣ الطريقة الميكانيكية-التجريبية لتصميم الرصف ٨٣
٥-٣-١ المبادئ الأساسية. ٨٣
٥-٣-٢ نموذج الرصف. ٨٧
٥-٣-٣ معايير التصميم. ٨٨
٥-٣-٤ العمر التصميمي. ٨٨
٥-٣-٥ الأحمال المرورية. ٨٩
٥-٣-٦ العوامل البيئية. ٩٤
٥-٣-٧ خواص المواد. ٩٥
٥-٣-٨ طريقة التصميم الإنشائي. ١٠٤
٥-٣-٩ منهجية المعايرة المحلية لطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) ١١٣
٥-٤ تصميم الرصفيات ذات المقطع العرضي الثابت ١١٤
٥-٤-١ نموذج الرصف. ١١٤
٥-٤-٢ العمر التصميمي. ١١٤
٥-٤-٣ الأحمال المرورية. ١١٤
٥-٤-٤ خواص المواد. ١١٤
٥-٤-٥ طريقة التصميم الإنشائي. ١١٥
٦- التصميم الإنشائي للرصف الصلب ١٢٢
٦-١ نموذج الرصف. ١٢٢
٦-٢ معايير التصميم. ١٢٢

٦-٣ العمر التصميمي..... ١٢٣
٦-٤ الأحمال المرورية..... ١٢٣
٦-٥ الموثوقية..... ١٢٤
٦-٦ العوامل البيئية..... ١٢٥
٦-٧ خصائص المواد..... ١٢٥
٦-٧-١ المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية..... ١٢٥
٦-٧-٢ طبقة ما تحت الأساس..... ١٢٥
٦-٧-٣ البلاطة..... ١٢٦
٦-٧-٤ الفواصل الطولية..... ١٢٧
٦-٧-٥ أجهزة تحويل الأحمال..... ١٢٧
٦-٧-٦ قضبان الربط..... ١٢٨
٦-٨ التصميم الإنشائي..... ١٢٨
٦-٨-١ الخصائص الإنشائية للرصفيات..... ١٢٨
٦-٨-٢ تصميم الرصف الصلب..... ١٣٣
٦-٨-٣ تصميم فواصل الرصف الصلب..... ١٤١
٦-٨-٤ رصف الخرسانة مسبقة الإجهاد..... ١٥٥
٧- تصميم الرصفيات المركبة..... ١٥٩
٧-١ نموذج الرصف..... ١٥٩
٧-٢ معايير التصميم..... ١٥٩
٧-٣ العمر التصميمي..... ١٥٩
٧-٤ الأحمال المرورية..... ١٥٩
٧-٥ العوامل البيئية..... ١٥٩
٧-٦ خواص المواد..... ١٥٩
٧-٧ التصميم الإنشائي..... ١٥٩
٨- تصميم رصفيات الفئات الخاصة..... ١٦٠
٨-١ الطرق غير المُعبّدة..... ١٦٠
٨-١-١ متطلبات التصميم..... ١٦٠
٨-١-٢ التخدد المسموح به..... ١٦٠
٨-١-٣ فاقد الركام..... ١٦٠
٨-١-٤ طريقة التصميم..... ١٦١
٨-٢ الطرق منخفضة الحجم المروري..... ١٦٥
٨-٣ رصفيات لأغراض خاصة:..... ١٦٦
٨-٣-١ الرصفيات المتداخلة:..... ١٦٦
٨-٣-٢ تصميم مواقف السيارات:..... ١٦٧

٤-٨ الأكتاف: **١٦٩**

٥-٨ الرصفيات في المواقع المرتفعة مستوى المياه الجوفية: **١٦٩**

٦-٨ تطبيقات المواد البديلة في تصميم الرصف: **١٧٠**

٨-٦-١ المواد: ١٧٠

٨-٦-٢ إطار التقييم: ١٧١

٩- تصميم تأهيل الرصفيات: **١٧٥**

٩-١ الطريقة: **١٧٥**

٩-٢ تقييم الرصف: **١٧٥**

٩-٣ طرق إعادة التأهيل: **١٧٥**

٩-٤ تقييم الرصف القائم: **١٧٥**

٩-٥ عملية تصميم إعادة التأهيل التجريبي للرصفيات المرنة: **١٧٥**

٩-٥-١ المبادئ الأساسية: ١٧٥

٩-٥-٢ تصميم السماكة لطبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية: ١٧٦

٩-٥-٣ تحديد الرقم الإنشائي (SN_f): ١٧٧

٩-٥-٤ تحديد الرقم الإنشائي (SN_{eff}): ١٧٨

٩-٦ عملية التصميم الميكانيكي-التجريبي لإعادة تأهيل الرصفيات المرنة: **١٨٦**

٩-٦-١ المبادئ الأساسية: ١٨٦

٩-٦-٢ تحديد حالة الرصف الراهنة: ١٨٨

٩-٦-٣ معالجة ما قبل طبقة التكسية: ١٩١

٩-٦-٤ تحديد معامل التلف للمواد المترابطة ولاحتكاك السطح البيني المُخفّض: ١٩٢

٩-٦-٥ تحديد خواص المواد غير المترابطة القائمة: ١٩٣

٩-٦-٦ طبقة تكسية من الخرسانة الأسمنتية للرصفيات المرنة القائمة: ١٩٤

٩-٧ عملية التصميم التجريبي لإعادة التأهيل للرصفيات الصلبة: **١٩٥**

٩-٧-١ المبادئ الأساسية: ١٩٥

٩-٧-٢ تصميم السماكة لطبقة تكسية من الخرسانة الأسمنتية لرصفيات الخرسانة العادية ذات الفواصل (JPCP) والخرسانة المسلحة ذات الفواصل (JRCP)والخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (CRCP): ١٩٥

٩-٧-٣ تصميم السماكة لطبقة تكسية من الخرسانة الأسمنتية (AC) لكل من رصفيات الخرسانة الأسمنتية/الخرسانة العادية ذات الفواصل (AC/JPCP) ورصفيات الخرسانة الأسمنتية/الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (AC/JRCP) ورصفيات الخرسانة الأسمنتية/الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (AC/CRCP): ٢٠٤

9-7-4 تصميم السماكة لطبقة التكسية من الخرسانة المترابطة لكل من رصفيات الخرسانة العادية (JPCP) ورصفيات الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (JRCP) الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (CRCP) ٢٠٨

٩-٧-٥ تصميم السماكة لطبقة التكسية غير المترابطة من رصف الخرسانة العادية ذات الفواصل (JPCP) أو رصف الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (JRCP) أو رصف الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (CRCP) لكل من رصفيات (JPCP) أو رصفيات (JRCP) أو رصفيات (CRCP) أو رصفيات الخرسانة الأسفلتية/خرسانة الأسمنت البورتلاندي (AC/PCC): ٢١٠

١٠- الممارسات الناشئة والرصفيات المستدامة: **٢١٤**

١٠-١ الرصفيات الدائمة: **٢١٤**

١٠-١-١ طبقة الأساس الأسفلتية: ٢١٤
١٠-١-٢ الطبقة الوسيطة: ٢١٤
١٠-١-٣ الطبقة السطحية: ٢١٤
١٠-١-٤ تصميم الرصف الدائم: ٢١٥
١٠-٢ خلطة أسفلتية معاد تدويرها: ٢١٥
١٠-٢-١ محتوى وخواص المادة الرابطة في رصف الأسفلت المستصلح: ٢١٥
١٠-٢-٢ مخططات بيانية للمزج: ٢١٦
١٠-٢-٣ خواص ركام رصف الأسفلت المستصلح: ٢١٦
١٠-٢-٤ صياغة العينة: ٢١٦
١٠-٣ خلطة الأسفلت الدافئ (WMA): ٢١٧
١٠-٤ الخلطات الأسفلتية الباردة: ٢١٨
١٠-٥ الرصفيات المخفضة للضوضاء: ٢١٨
١٠-٦ المركبات ذاتية القيادة وتصميم الرصف: ٢١٨
المراجع: ٢٢٠
الملحق أ – عوامل تكافؤ الأحمال للتصميم الإنشائي للرصف المرن: ٢٢١
الملحق ب - المعامل الفعال لمرونة القاعدة الترابية للرصفيات المرنة ٢٣٣
الملحق ج - مثال على التصميم الإنشائي للرصف المرن بطريقة (AASHT0) التجريبية: ٢٣٤
الملحق د - عوامل تكافؤ الأحمال للتصميم الإنشائي للرصف الصلب: ٢٣٩
الملحق هـ - مثال على التصميم الإنشائي للرصف الصلب باستخدام طريقة (AASHTO) التجريبية: ٢٥١
الملحق و - عوامل تكافؤ الأحمال لتصميم رصف مرن بقطاع عرضي ثابت ٢٥٩
الملحق ز - مثال على تصميم الطرق غير المُعبّدة: ٢٦٠
الملحق ح – المواصفات المرجعية ٢٦٥
الملحق ط - مسرد المصطلحات ٢٧٧
الملحق ي - الاختصارات والرموز ٢٨١
الملحق ك - الوحدات ٢٨٧

قائمة الأشكال

الشكل (٢–١) مراحل دورة حياة الرصف. ٤

الشكل (٢–٢) مقطع عرضي نموذجي للرصف المرن. ٥

الشكل (٢–٣) مقطع عرضي نموذجي للرصف الصلب. ٦

الشكل (٢–٤) رصف الخرسانة العادية ذو الفواصل (JPCP). ٦

الشكل (٢–٥) رصف الخرسانة المسلحة ذو الفواصل (JRCP). ٧

الشكل (٢–٦) رصف الخرسانة المسلحة المستمر (CRCP). ٧

الشكل (٢–٧) مقطع عرضي نموذجي للرصف المركب. ٧

الشكل (٢–٨) طريقة التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020). ٩

الشكل (٢–٩) الفروق النمطية بين طريقة التصميم التجريبي ونظام التصميم الميكانيكي-التجريبي المتكامل، من حيث خصائص خلطة الخرسانة الأسفلتية (AASHTO, 2020) (AC). ١٠

الشكل (٣–١) توضيح لحدود أتيربيرج. ١٣

الشكل (٣–٢) اختبار لوح التحميل لتربة القاعدة الترابية. ١٤

الشكل (٣–٣) مخطط تصنيف احتمالية الانتفاخ. ١٦

الشكل (٣–٤) مناطق الحرارة في المملكة العربية السعودية. ٢٨

الشكل (٣–٥) مخطط درجات حرارة الخلط والدمك. ٣٢

الشكل (٣–٦) تحديد تدفق مارشال. ٣٥

الشكل (٤–١) مخطط تصنيف المركبات للإدارة الاتحادية (الأمريكية) للطرق (FDOT, 2018). ٥٧

الشكل (٤–٢) مقطورة. ٥٩

الشكل (٤–٣) قاطرة. ٥٩

الشكل (٤–٤) مقطورة. ٥٩

الشكل (٤–٥) حافلة. ٥٩

الشكل (٤–٦) شاحنة. ٥٩

الشكل (٤–٧) شاحنة مزودة بمقطورتين من النوع (أ): قاطرة ومقطورة أولى ومقطورة ثانية ذات محور مركزي. ينبغي أن تحتوي القاطرة على محورين خلفيين على الأقل. ٦٠

الشكل (٤–٨) شاحنة مزودة بمقطورتين من النوع (ب): شاحنة وعربة (Dolly) ومقطورة. ينبغي أن تحتوي الشاحنة على محورين خلفيين على الأقل. ٦٠

الشكل (٤–٩) شاحنة مزودة بمقطورتين من النوع (ب): قاطرة، مقطورة مسطحة (B-train) ومقطورة ثانية. ينبغي أن تحتوي القاطرة على محورين خلفيين على الأقل. ٦٠

الشكل (٥–١) مقطع نموذجي للهيكل الإنشائي للرصف المرن. ٦٥

الشكل (٥–٢) مخطط تقدير المعامل الفعال لمرونة القاعدة الترابية للرصفيات المرنة (AASHTO, 1993). ٧١

الشكل (٥–٣) مخطط تقدير معامل الطبقة الإنشائية لخرسانة أسفلتية كثيفة التدرج بناء على معامل المرونة (AASHTO, 1993). ٧٤

الشكل (٥–٤) تفاوت معامل طبقة الأساس الحبيبية (a2) مع مختلف معلمات قوة الأساس (AASHTO, 1993). ٧٥

الشكل (٥–٥) تفاوت معامل طبقة ما تحت الأساس الحبيبية (a3) مع مختلف معلمات قوة ما تحت الأساس (AASHTO, 1993). ٧٦

الشكل ٥–٦ تفاوت المعامل (a2) لطبقات الأساس المعالجة بالأسمنت مع مختلف معلمات قوة الأساس (AASHTO, 1993). ٧٧

الشكل (٥–٧) تفاوت المعامل (a2) لطبقات الأساس المعالجة بالأسفلت مع مختلف معلمات قوة الأساس (AASHTO, 1993)..٧٨
الشكل (٥–٨) مخطط تصميمي للرصف المرن (AASHTO, 1993).....٨١
الشكل (٥–٩) طريقة تحديد سُمك الطبقات باستخدام نهج التحليل الطبقي وفقًا لطريقة (AASHT0) التجريبية.....٨٢
الشكل (٥–١٠) مخطط انسيابي مفاهيمي لعملية التصميم/التحليل المكومة من ثلاث مراحل للطريقة الميكانيكية-التجريبية لتصميم الرصف (AASHTO, 2020).....٨٥
الشكل (٥–١١) مخطط انسيابي للخطوات اللازمة لإكمال تحليل استراتيجية التصميم التجريبي (AASHTO, 2020).....٨٦
الشكل (٥–١٢) استراتيجيات تصميم رصف مرن جديد يمكن محاكاته مع طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020).....٨٧
الشكل (٥–١٣) رسم بياني لأخماس درجات الحرارة الخمس المستخدمة في طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) لتحديد خواص خلطة الخرسانة الأسفلتية لحالات العيوب المتعلقة بالحمل (AASHTO, 2020).....١٠٧
الشكل (٥–١٤) نموذج الرصف للتحليل الإنشائي.....١١٤
الشكل (٥–١٥) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: خفيف جدًا (VL).....١١٥
الشكل (٥–١٦) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: خفيف (L).....١١٦
الشكل(٥–١٧) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: متوسط (M).....١١٧
الشكل (٥–١٨) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: مرتفع (H).....١١٨
الشكل (٥–١٩) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: مرتفع جدًا (VH).....١١٩
الشكل (٥–٢٠) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: مرتفع للغاية (EH).....١٢٠
الشكل (٦–١) قطاع نموذجي للهيكل الإنشائي للرصف الصلب.....١٢٢
الشكل (٦–٢) رسم بياني لتقدير المعامل المركب لرد فعل القاعدة الترابية، k، بافتراض أن عمق القاعدة الترابية شبه لا نهائي (AASHTO, 1993).....١٣٥
الشكل (٦–٣) رسم بياني لتحسين معامل رد فعل القاعدة الترابية لمراعاة تأثيرات الأساسات الصلبة بالقرب من السطح ضمن حدود ٣ أمتار (١٠ أقدام) (AASHTO, 1993).....١٣٦
الشكل (٦–٤) رسم بياني لتقدير التلف النسبي للرصفيات الصلبة بناء على سُمك البلاطة ودعاماتها (AASHTO, 1993).....١٣٧
الشكل (٦–٥) تصحيح معامل رد فعل القاعدة الترابية لفاقد دعم طبقة ما تحت الأساس المحتمل (AASHTO, 1993).....١٣٨
الشكل (٦–٦) رسم بياني تصميمي للرصفيات الصلبة مبني على استخدام القيم المتوسطة لكل متغير من المدخلات (AASHTO, 1993).....١٤٠
الشكل (٦–٧) رسم بياني تصميمي لحديد تسليح الرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل (AASHTO, 1993).....١٤٤
الشكل (٦–٨) رسم بياني لتقدير قوة شد حمل العجلة (AASHTO, 1993).....١٤٧
الشكل (٦–٩) النسبة المئوية للتسليح الطولي لاستيفاء معايير تباعد الشقوق (AASHTO, 1993).....١٥٠
الشكل (٦–١٠) الحد الأدنى للنسبة المئوية للتسليح الطولي لاستيفاء معيار عرض الشق (AASHTO, 1993).....١٥١
الشكل (٦–١١) الحد الأدنى للنسبة المئوية للتسليح الطولي لاستيفاء معايير إجهاد الحديد (AASHTO, 1993).....١٥٢
الشكل (٦–١٢) الحد الأقصى الموصى به لتباعد قضبان الربط لرصفيات خرسانة الأسمنت البورتلاندي بافتراض أن قطر قضيب الربط ١٢,٧ ملم (٠,٥ بوصة) وأن الحديد من الدرجة ٤٠، وأن معامل احتكاك القاعدة الترابية هو (١,٥) (AASHTO, 1993).
١٥٤.....
الشكل (٦–١٣) الحد الأقصى الموصى به لتباعد قضبان الربط لرصفيات خرسانة الأسمنت البورتلاندي بافتراض أن قطر قضيب الربط ١٥,٩ ملم (٨/٥ بوصة) وأن الحديد من الدرجة ٤٠، وأن معامل احتكاك القاعدة الترابية هو (١,٥) (AASHTO, 1993).
١٥٥.....

الشكل (٨–١) مخطط تصميمي للطرق المكسوة بالركام مع الأخذ في الاعتبار الفاقد في قابلية الخدمة المسموح به (AASHTO, 1993). ١٦٣
الشكل (٨–٢) مخطط تصميمي للطرق المكسوة بالركام مع الأخذ في الاعتبار التخدد المسموح به (AASHTO, 1993). ١٦٤
الشكل (٨–٣) مُخطط لتحويل جزء من سماكة طبقة الأساس الركامية إلى سماكة مكافئة لطبقة ما تحت الأساس (AASHTO, 1993). ١٦٥
الشكل (٨–٤) المقطع العرضي النمطي للرصف الخرساني المتداخل النفاذ (FHWA-HIF-19-021, 2019). ١٦٦
الشكل (٩–١) فقدان القدرة الإنشائية عبر الوقت ومع حركة المرور (AASHTO, 1993). ١٧٦
الشكل (٩–٢) تحديد النسبة (EP/MR) (AASHTO, 1993). ١٨١
الشكل (٩–٣) التعديل إلى قيمة الانحراف المقاس عند مركز لوح التحميل (d_o) لدرجة حرارة خلطة الخرسانة الأسفلتية للرصفيات ذات طبقات الأساس الحبيبية أو المعالجة بالأسفلت (AASHTO, 1993). ١٨٢
الشكل (٩–٤) التعديل إلى قيمة الانحراف المقاس عند مركز لوح التحميل (d_o) لدرجة حرارة خلطة الخرسانة الأسفلتية للرصفيات ذات طبقات الأساس المعالجة بالأسمنت أو البوزولان (AASHTO, 1993). ١٨٣
الشكل (٩–٥) الرقم الإنشائي الفعال (Sneff) من طريقة اختبار الانحراف غير الإتلافي (NDT) (AASHTO, 1993). ١٨٤
الشكل (٩–٦) العلاقة بين عامل الحالة والعمر المتبقي (AASHTO, 1993). ١٨٦
الشكل (٩–٧) مخطط التدفق المفاهيمي لعملية التصميم/التحليل ثلاثية المراحل لتصميم إعادة التأهيل (AASHTO, 2020). ١٨٧
الشكل (٩–٨) خطوات لتحديد استراتيجية إعادة التأهيل المفضلة. ١٨٨
الشكل (٩–٩) العامل (A) لتحويل القصور في سماكة خرسانة الأسمنت البورتلاندي إلى سماكة طبقة تكسية من الخرسانة الأسمنتية (AASHTO, 2020). ١٩٦
الشكل (٩–١٠) تحديد (قيمة-k) الديناميكية الفعالة - من قيمة الانحراف في مركز لوح التحميل (do) والمساحة (AREA) (AASHTO, 2020). ١٩٨
الشكل (٩–١١) تحديد معامل مرونة خرسانة الأسمنت البورتلاندي باستخدام (قيمة-k) والمساحة (AREA) وسماكة البلاطة (AASHTO, 2020). ١٩٩
الشكل (٩–١٢) عامل تعديل الفواصل والشقوق (Fjc) (AASHTO, 1993). ٢٠٢
الشكل (٩–١٣) عامل تعديل الفواصل والشقوق لطبقة التكسية الخرسانية غير المترابطة (Fjcu) لكل من رصف الخرسانة العادية ذات الفواصل (JPCP) ورصف الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (JRCP) ورصف الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (CRCP) (AASHTO, 1993). ٢١٣
الشكل (ب–١) مثال لتقدير المعامل الفعال لمرونة طبقة القاعدة الترابية للرصفيات المرنة (AASHTO,1993). ٢٣٣
الشكل (ج–١) مثال لرسم بياني تصميمي للرصفيات المرنة. ٢٣٥
الشكل (ج–٢) مثال لتقدير معامل الطبقة الإنشائية للخرسانة الأسفلتية كثيفة التدرج. ٢٣٦
الشكل (ج–٣) مثال لتقدير معامل طبقة الأساس الحبيبية (a2). ٢٣٦
الشكل (ج–٤) مثال لتقدير معامل طبقة ما تحت الأساس الحبيبية (a3). ٢٣٧
الشكل (ج–٥) مثال للقطاع العرضي النهائي للرصف المرن. ٢٣٨
الشكل (ه–١) مثال لتقدير المعامل المركب لرد فعل القاعدة الترابية. ٢٥٣
الشكل (ه–٢) مثال لتقدير التلف النسبي للرصفيات الصلبة بناءً على سمك البلاطة والدعم أسفلها. ٢٥٤
الشكل (ه–٣) مثال لتصحيح معامل تفاعل القاعدة الترابية لفقدان دعم طبقة ما تحت الأساس المحتمل. ٢٥٥
الشكل (ه–٤) مثال للرسم البياني التصميمي للرصفيات الصلبة. ٢٥٧
الشكل (ه–٥) مثال للقطاع العرضي النهائي للرصف الصلب. ٢٥٨

الشكل (و–١) عوامل تكافؤ الأحمال لإجمالي الأحمال المحورية من ١ إلى ١٥ طنًا. ٢٥٩
الشكل (و–٢) عوامل تكافؤ الأحمال لإجمالي الأحمال المحورية الأقل من ١ طن..... ٢٥٩
الشكل (ز–١) مثال للرسم البياني التصميمي للطرق ذات الأسطح الركامية مع الأخذ في الاعتبار الفاقد في قابلية الخدمة المسموح به. ٢٦١
الشكل (ز–٢) مثال للرسم البياني التصميمي للطرق ذات الأسطح الركامية مع الأخذ في الاعتبار التخدد المسموح به..... ٢٦٢
الشكل (ز–٣) مثال على تزايد التلفيات الكلية مقابل سماكة طبقة الأساس لكلا معياري قابلية الخدمة والتخدد. ٢٦٣
الشكل (ز–٤) مثال على تحويل جزء من سماكة طبقة الأساس الركامية إلى سماكة مكافئة لطبقة ما تحت الأساس. ٢٦٤

قائمة الجداول

الجدول (٢–١) الفروق النمطية بين طريقة التصميم التجريبي ونظام التصميم الميكانيكي-التجريبي المتكامل. ١١
الجدول (٣–١) نظام (AASHTO) لتصنيف التربة. ١٢
الجدول (٣–٢) تدرج مواد طبقة ترشيح المصرف السفلي. ١٥
الجدول (٣–٣) متطلبات الجودة لخلطات طبقات الأساس. ١٧
الجدول (٣–٤) متطلبات التدرج لخلطات طبقات الأساس. ١٨
الجدول (٣–٥) التدرجات مفتوحة التدرّج. ١٨
الجدول (٣–٦) متطلبات الجودة لركام طبقة ما تحت الأساس. ١٩
الجدول (٣–٧) متطلبات التدرج لطبقات الأساس الحصوية. ١٩
الجدول (٣–٨) التدرج في خلطات الخرسانة المدموكة بمدحلة. ٢١
الجدول (٣–٩) مواصفات الأسفلت المصنف للاختراق. ٢٤
الجدول (٣–١٠) مواصفات الأسفلت المصنف باللزوجة. ٢٥
الجدول (٣–١١) تحديد قيمة الكود (Z) – مسميات مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) والمرور. ٢٦
الجدول (٣–١٢) متطلبات الجودة لدرجات أداء مادة رابطة للأسفلت. ٢٦
الجدول (٣–١٣) متطلبات خصائص الإجماع للركام (Asphalt Institute, 2014). ٣٠
الجدول (٣–١٤) اختبارات خواص المصدر الموصى بها ومتطلباتها النموذجية (Asphalt Institute, 2014). ٣١
الجدول (٣–١٥) تدرج الركام - نقاط التحكم (Asphalt Institute, 2014). ٣١
الجدول (٣–١٦) نسب ارتباط الاستقرار (Asphalt Institute, 2014). ٣٥
الجدول (٣–١٧) معايير مارشال لتصميم الخلطة (Asphalt Institute, 2014). ٣٧
الجدول (٣–١٨) الحد الأدنى للنسبة المئوية للفراغات في الركام المعدني (Asphalt Institute, 2014). ٣٧
الجدول (٣–١٩) مجهود الدمك الدوراني لخلطة سوبربيف. ٤٠
الجدول (٣–٢٠) متطلبات خلطة سوبربيف. ٤٢
الجدول (٣–٢١) متطلبات اختبار أثر عجلة هامبورغ. ٤٣
الجدول (٣–٢٢) أنواع الأسمنت المستخدمة في إنشاء طبقات الرصف الأسمنتية. ٤٤
الجدول (٣–٢٣) متطلبات الركام الناعم. ٤٤
الجدول (٣–٢٤) تدرجات ركام الخرسانة الناعم. ٤٥
الجدول (٣–٢٥) متطلبات الركام الخشن. ٤٥
الجدول (٣–٢٦) تدرجات ركام الخرسانة الخشن. ٤٦
الجدول (٣–٢٧) متطلبات الركام المختلط. ٤٦
الجدول (٣–٢٨) القيم القصوى من الكلوريدات والكبريتات. ٤٧
الجدول (٣–٢٩) المواصفات المنطبقة على مختلف المضافات. ٤٧
الجدول (٣–٣٠) أصناف وفئات التعرض. ٤٨
الجدول (٣–٣١) متطلبات الخرسانة حسب فئة التعرض. ٤٩
الجدول (٣–٣٢) متطلبات تسميات الفئات الخرسانية. ٤٩
الجدول (٣–٣٣) قيم الهبوط الموصى بها لطبقات الرصف والبلاطات. ٥٠

الجدول (٣–٣٤) اشتراطات الكميات التقريبية لمياه الخلط ومحتوى الهواء في الخلطة للقيم المختلفة للهبوط والمقاسات الاسمية القصوى للركام. ٥١
الجدول (٣–٣٥) العلاقة بين قوة الضغط المحددة ومتوسط قوة الضغط. ٥٢
الجدول (٣–٣٦) العلاقة بين نسبة الماء إلى الأسمنت ومتوسط قوة الضغط المطلوبة. ٥٢
الجدول (٣–٣٧) حجم الركام الخشن لكل وحدة من حجم الخرسانة. ٥٣
الجدول (٤–١) أقصى وزن على محورين متجاورين (محور ترادفي). ٥٧
الجدول (٤–٢) الوزن الأقصى المسموح به لثلاثة محاور متجاورة (ترادفيًا). ٥٨
الجدول (٤–٣) الأوزان النظامية للشاحنات حسب وزارة النقل والخدمات اللوجستية (المواصلات سابقًا). ٥٨
الجدول (٥–١) مدى مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) في المسار التصميمي وفئات تصنيف المرور. ٦٣
الجدول (٥–٢) طرق التصميم المسموح بها لإنشاء الرصف المرن الجديد. ٦٤
الجدول (٥–٣) مستوى قابلية الخدمة النهائية وقبول العموم (AASHTO,1993). ٦٦
الجدول (٥–٤) المستويات الموصى بها لقابلية الخدمة النهائية. ٦٦
الجدول (٥–٥) العمر التصميمي (فترة التحليل) (AASHTO, 1993). ٦٧
الجدول (٥–٦) عامل توزيع المرور على مسارات الطريق (AASHTO,1993). ٦٨
الجدول (٥–٧) مستويات الموثوقية الموصى بها وفقًا لكل فئة تصنيف. ٦٩
الجدول (٥–٨) القيم النموذجية لحالة الإجهاد (θ) لطبقة أساس ركامية (AASHTO, 1993). ٧٣
الجدول (٥–٩) القيم النموذجية لحالة الإجهاد (θ) لطبقة ما تحت الأساس (AASHTO, 1993). ٧٦
الجدول (٥–١٠) مستويات الصرف (AASHTO, 1993). ٧٩
الجدول (٥–١١) قيم (mi) الموصى بها لتعديل معاملات الطبقة الإنشائية لمواد الأساس وما تحت الأساس غير المعالجة في الرصف المرن (AASHTO, 1993). ٧٩
الجدول (٥–١٢) الحد الأدنى للسمك (AASHTO, 1993). ٨٣
الجدول (٥–١٣) توزيع التحميل المروري المُطبّع (normalized) المتضمن في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020). ٩١
الجدول (٥–١٤) وصف مجموعات التصنيف المروري للشاحنات وما يقابلها من قيم افتراضية لتوزيع فئات الشاحنات المتضمنة في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020). ٩١
الجدول (٥–١٥) تعريفات وأوصاف مجموعات التصنيف المروري للشاحنات (AASHTO, 2020). ٩٣
الجدول (٥–١٦) أنواع المواد الرئيسة لطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020) (MEPDG)... ٩٥
الجدول (٥–١٧) المواد الأسفلتية وبروتوكولات الاختبار لقياس مدخلات خواص المواد لطبقات الخرسانة الأسفلتية الجديدة، المستوى ١ للمدخلات (AASHTO, 2020). ٩٦
الجدول (٥–١٨) معلمات المدخلات والقيم المُوصى بها؛ قدرات اختبار محدودة أو معدومة للخرسانة الأسفلتية (المستويين ٢ و/أو ٣ للمدخلات) (AASHTO, 2020). ٩٩
الجدول (٥–١٩) متطلبات المواد الخاصة بالمستوى ١ للمدخلات للتربة الحبيبية غير المترابطة لكل من الأساس، وما تحت الأساس، وتربة القاعدة الترابية، وجسر الطريق، وكذلك بروتوكولات الاختبار للمواد الجديدة والقائمة (AASHTO, 2020). ١٠١
الجدول (٥–٢٠) قيم ومعلمات المستويين ٢ و ٣ للمدخلات الموصى بها لخواص مواد التربة غير المترابطة لكل من الأساس، وما تحت الأساس، وجسر الطريق، والقاعدة الترابية (AASHTO, 2020). ١٠٣
الجدول (٥–٢١) مستويات المدخلات النموذجية المستخدمة في المعايرة العامة لنماذج البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED) والدوال التحويلية (AASHTO, 2020). ١٠٥
الجدول (٥–٢٢) مستويات المدخلات الموصى بها لتصنيف الطرق في المملكة العربية السعودية. ١٠٦

الجدول (٥–٢٣) معايير التصميم أو القيم الحدية (العتبة) الموصى باستخدامها للحكم على مدى قبول التصميم التجريبي (AASHTO, 2020). ١١٢
الجدول (٥–٢٤) القيم الحدية لمعايير الأداء المقترح العمل بها في المملكة العربية السعودية. ١١٢
الجدول (٥–٢٥) الحد الأدنى من المستويات المقترحة للموثوقية لمختلف التصنيفات الوظيفية للطرق (AASHTO, 2020). ١١٣
الجدول (٥–٢٦) المقاطع العرضية للرصف الثابت، مدى نسبة تحمل كاليفورنيا (٥ - ٩ ٪). ١٢٠
الجدول (٥–٢٧) المقاطع العرضية للرصف الثابت، مدى نسبة تحمل كاليفورنيا (١٠ - ٢٠ ٪). ١٢١
الجدول (٥–٢٨) المقاطع العرضية للرصف الثابت، مدى نسبة تحمل كاليفورنيا أكبر من ٢٠٪. ١٢١
الجدول (٦–١) القيم الموصى بها لمعامل الصرف (Cd) لتصميم الرصف الصلب. ١٢٥
الجدول (٦–٢) معامل تحويل الأحمال الموصى به لمختلف أنواع الرصف وظروف التصميم (AASHTO, 1993). ١٢٨
الجدول (٦–٣) بعض قيم المدى النموذجية لعامل فقدان الدعم (LS) لأنواع مختلفة من المواد (AASHTO, 1993). ١٢٩
الجدول (٦–٤) بعض قيم المدى النموذجية لعامل فقدان الدعم (LS) لأنواع مختلفة من المواد (AASHTO, 1993). ١٣١
الجدول (٦–٥) العلاقة التقريبية بين الانكماش وقوة الشد غير المباشرة لخرسانة الأسمنت البورتلاندي (AASHTO, 1993). ١٣٢
الجدول (٦–٦) القيم الموصى بها للمعامل الحراري لخرسانة الأسمنت البورتلاندي كدالة في نوع الركام (AASHTO, 1993). ١٣٢
الجدول (٦–٧) جدول لتقدير المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية (AASHTO, 1993). ١٣٣
الجدول (٦–٨) ورقة عمل لتصميم حديد التسليح الطولي (AASHTO, 1993). ١٤٥
الجدول(٦–٩) ورقة عمل لتصميم حديد التسليح الطولي المنقح (AASHTO, 1993). ١٤٥
الجدول (٦–١٠) الإجهاد العامل المُقيّد المسموح به للحديد (AASHTO, 1993). ١٤٨
الجدول (٨–١) مُخطط لحساب تلفيات الرصف الإجمالية استنادًا إلى سماكة الأساس الركامي في المحاولة التجريبية. ١٦٢
الجدول (٨–٢) فئات المرور (ACI 330R-08). ١٦٨
الجدول (٨–٣) توصيات سُمك التصميم لعمر عشرين عامًا (بدون قضبان وتدية) (ACI 330R-08). ١٦٨
الجدول (٨–٤) تطبيقات المواد البديلة في إنشاء الطرق (FHWA, 2008). ١٧٠
الجدول (٩–١) جدول معاملات الطبقة المقترحة لمواد طبقات رصف الخرسانة الأسفلتية القائمة (AASHTO, 1993). ١٧٩
الجدول(٩–٢) مستويات المدخلات الهرمية لبرنامج تقييم الرصف لتحديد المدخلات الخاصة بطبقات الرصف القائمة بهدف تصميم إعادة التأهيل (AASHTO, 2020). ١٨٨
الجدول (٩–٣) تعريفات لحالة السطح لتصنيفات حالة الرصف من المستوى ٣ للمدخلات وخيارات إعادة التأهيل المقترحة (AASHTO, 2020). ١٩٠
الجدول (٩–٤) الإصلاحات أو معالجة ما قبل طبقة التكسية المُرشَّحة للاستخدام مع الرصفيات المرنة (AASHTO, 2020). ١٩١
الجدول (٩–٥) مواد الأسفلت وبروتوكولات الاختبار لقياس مدخلات خواص مواد طبقات خلطة الأسفلت الساخن القائمة (AASHTO, 2020). ١٩٣
الجدول (٩–٦) متطلبات مواد التربة الحبيبية غير المترابطة لطبقة الأساس، وطبقة ما تحت الأساس، وجسر الطريق، والقاعدة الترابية وبروتوكولات الاختبار للمواد القائمة (AASHTO, 2020). ١٩٣
الجدول (٩–٧) معامل نقل الحمل (AASHTO, 1993). ٢٠٠
الجدول (٩–٨) عامل تعديل المتانة (Fdur) (AASHTO, 1993). ٢٠٣
الجدول (٩–٩) عامل تعديل تلف الكلل (Ffat) (AASHTO, 1993). ٢٠٣
الجدول (٩–١٠) عامل تعديل المتانة (Fdur) (AASHTO, 1993). ٢٠٨

الجدول (٩–١١) عامل تعديل جودة الخرسانة الأسمنتية (Fac) (AASHTO, 1993). ٢٠٨
الجدول (٩–١٢) عامل تعديل المتانة (Fdur) (AASHTO, 1993). ٢١٠
الجدول (١٠–١) المبادئ التوجيهية لاختيار المادة الرابطة في خلطات رصف الأسفلت المستصلح. ٢١٦
الجدول (١٠–٢) الحد الأدنى لمتطلبات رقم التدفق. ٢١٨
الجدول (أ–١) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993) ...
الجدول (أ–٢) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993). ٢٢٢
الجدول (أ–٣) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993). ٢٢٣
الجدول (أ–٤) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993). ٢٢٤
الجدول (أ–٥) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993). ٢٢٥
الجدول (أ–٦) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993). ٢٢٧
الجدول (أ–٧) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993). ٢٢٩
الجدول (أ–٨) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993). ٢٢٩
الجدول (أ–٩) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993). ٢٣١
الجدول (د–١) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993). ٢٣٩
الجدول (د–٢) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993). ٢٤٠
الجدول (د–٣) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993). ٢٤١
الجدول (د–٤) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993). ٢٤٣
الجدول (د–٥) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993). ٢٤٤
الجدول (د–٦) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993). ٢٤٥
الجدول (د–٧) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993). ٢٤٧
الجدول (د–٨) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993). ٢٤٨
الجدول (د–٩) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993). ٢٤٩
الجدول (ه–١) مثال لتقدير المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية. ٢٥١

الجدول (ز–١) مثال لحساب تلفيات الرصف الإجمالية استنادًا إلى سماكة طبقة الأساس الركامية التجريبية..... ٢٦٠
الجدول (ح–١) عناوين وتسميات مواصفات (AASHTO) و (ASTM) و (MRDTM) و (ACI) و (SASO) المنطبقة على المجلد. ٢٦٥

١- المقدمة:

١-١ ملخص الأبواب:

ينقسم **مجلد كود الطرق السعودي ٣٠٨ (تصميم الرصف)** إلى عشرة أبواب، وفيما يلي عرض موجز لتلك الأبواب.

الباب (١): المقدمة – يعرض هذا الباب ملخصًا للأبواب، ومدى هذا الجزء من الكود ومواصفاته وأكواده المرجعية.

الباب (٢): أسس تصميم الرصف – يتناول هذا الفصل مكونات تصميم الرصف، مثل المرونة والاستدامة. وتُعرض ثلاثة أنواع أساسية من الرصفيات، وهي الرصفيات المرنة والصلبة والمُركبّة. ويضم -أيضًا- طرق تصميم الرصف ومبادئها الأساسية.

الباب (٣): مواد الرصف – يغطي هذا الباب المواد المستخدمة للرصفيات. ويشمل مواد القاعدة الترابية وتثبيت استقرار التربة والركام غير المترابط والركام المستقر والركام المعاد تدويره والمواد الأسفلتية ومواد الخلطة الأسفلتية (الأسفلت الخرساني)، وخرسانة الأسمنت البورتلاندي.

الباب (٤): التحليل المروري – يتناول هذا الباب التحليل المروري المعتبر في إطار تصميم الرصف، ويشمل العوامل التي ينبغي مراعاتها عند تقدير حجم المرور التراكمي من حيث الأحمال المحورية خلال فترة تصميم الرصف. وهذه العوامل هي: حجم حركة المرور وتصنيف المركبات، وتوزيع أصناف المركبات ونسبة المركبات الثقيلة ومعدل النمو السنوي وعامل النمو وعامل تكافؤ الأحمال.

الباب (٥): التصميم الإنشائي للرصف المرن – يعرض هذا الباب إطارًا لتصميم الرصفيات المرنة الجديدة. ويعرض ثلاث طرق: التجريبية والميكانيكية-التجريبية والمقطع العرضي للرصف ثابت السماكة. ويتناول أيضًا المبادئ الأساسية ومعايير التصميم وخواص المواد والتصميم الإنشائي لكل طريقة من طرق التصميم. ويشمل -أيضًا- إطارًا لاختيار طريقة التصميم.

الباب (٦): التصميم الإنشائي للرصف الصلب – يعرض هذا الباب إطارًا لتصميم الرصفيات الصلبة الجديدة. ويشمل المبادئ الأساسية وخواص المواد ومعايير التصميم.

الباب (٧): تصميم الرصفيات المركبة – يعرض هذا الباب إطارًا لتصميم الرصفيات المركبة. ويشمل المبادئ الأساسية وخواص المواد ومعايير التصميم.

الباب (٨): تصميم رصفيات الفئات الخاصة – يعرض هذا الباب مبادئ التصميم للطرق غير المعبدة وساحات وقوف المركبات والطرق ذات الأحجام المرورية المنخفضة والرصفيات المتشابكة والرصفيات في المواقع التي تحتوي على مياه جوفية ذات منسوب مرتفع.

الباب (٩): تصميم إعادة تأهيل الرصفيات – يتناول هذا الباب تصميم تأهيل الرصفيات. ويشمل عملية تأهيل الرصفيات المرنة باتباع طرق تصميم التأهيل التجريبية والميكانيكية-التجريبية. كما يشمل -أيضًا- عملية تصميم التأهيل التجريبي للرصفيات الصلبة لكل من:

١- طبقة التكسية الأسفلتية (AC) لكل من الرصفيات الخرسانية العادية ذات الفواصل (JPCP)، والرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل (JRCP) والرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح (CRCP).
٢- طبقة التكسية الأسفلتية لكل من الرصفيات الأسفلتية/الخرسانية العادية ذات الفواصل (AC/JPCP)، والرصفيات الأسفلتية/الخرسانية المسلحة ذات الفواصل (AC/JRCP) والرصفيات الأسفلتية/الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح (AC/CRCP).
٣- طبقة التكسية للخرسانية المترابطة لكل من الرصفيات الخرسانية العادية ذات الفواصل (JPCP)، والرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل (JRCP) والرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح (CRCP)
٤- طبقة التكسية الخرسانية غير المترابطة لكل من الرصفيات الخرسانية العادية ذات الفواصل (JPCP)، والرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل (JRCP) والرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح (CRCP).
٥- طبقة التكسية الخرسانية المسلحة المستمرة (CRCP) لكل من الرصفيات الخرسانية العادية ذات الفواصل (JPCP)، والرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل (JRCP) والرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح (CRCP) أو خرسانة الأسمنت البورتلاندي (PCC).

الباب (١٠): الممارسات الناشئة والرصفيات المستدامة – يتناول هذا الباب بعض الممارسات المستدامة الناشئة التي يمكن تبنيها، مثل الرصفيات الدائمة (مدى العمر) وخلطة الأسفلت معاد التدوير، والأسفلت المخلوط على الدافئ وعلى البارد، والرصفيات المخففة للضوضاء والمركبات ذاتية القيادة.

١-٢ النطاق:

يتمثل مدى هذا المجلد في تزويد مهندس تصميم الرصف بمعلومات وإرشادات كافية، بحيث يمكن تطوير بيانات الإدخال الضرورية، وتطبيق المبادئ الهندسية المناسبة لتصميم الرصفيات الجديدة، أو تطوير مشروع تأهيل رصف مصمم بشكل ملائم.

١-٣ المواصفات والأكواد المرجعية:

إن مواصفات وأكواد جميع المواد والإجراءات يجب أن تكون على النحو المحدد في هذه المواصفات العامة في وثائق العقد -إن وجدت- في طبعتها الأحدث، كما يلي:

- المواصفات القياسية للاتحاد الأمريكي للمسؤولين الحكوميين عن الطرق والنقل (AASHTO) لمواد النقل وطرق أخذ العينات والاختبار.
- الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد (ASTM).
- مواصفات المعهد الأمريكي للخرسانة (ACI).
- طريقة اختبار إدارة أبحاث المواد (MRDTM).
- اللوائح الفنية للهيئة السعودية للمواصفات والمقاييس والجودة (SASO).

يعرض الجدول (ح-١) المواصفات المرتبطة بطرق تصميم الرصف واختبار المواد، بما في ذلك التسميات والعناوين. تُضمَّن هذه المواصفات أيضًا في كود الطرق السعودي ٣٠٩ (مواصفات المواد والاختبارات القياسية).

٢- مبادئ تصميم الرصف:

٢-١ مكونات تصميم الرصف:

٢-١-١ المرونة:

العوامل البيئية التي يمكن أن تؤثر على أداء الرصف تشمل: درجات الحرارة، وهطول الأمطار، وارتفاع مستوى مياه البحر. ونتيجة لذلك ترجع أسباب الكثير من عيوب الرصف إلى المعلمات المناخية. على الرغم من افتراض المهندسين تحقق الثبات عادة (أي: ثبات المتوسط والتباين وغيرهما من الخصائص الإحصائية للسلسلة الزمنية مع الوقت) وذلك من الناحية العملية، إلا أنه في الواقع لا تكون الظروف البيئية المتعلقة بالمناخ ثابتة حقيقة. ومع ذلك، تُفترض هذه الظروف البيئية ثابتة وتُبنى على البيانات السابقة للظروف المناخية. وبسبب هذا الافتراض، يُحتمل ألا تكون الرصفيات التي تنفذ اليوم واقعية لتلائم الظروف المناخية المستقبلية في بعض الأحيان. ونتيجة لذلك، يحتمل أن يتعرض أداء الرصفيات للعيوب في المستقبل، والتي تتنوع بين التشققات الحرارية والضعف بسبب تراكم الثلوج وذوبانها. ونظرًا لأن أدوات تصميم الرصف وتحليله الحالية -عمومًا- تستخدم مصادر بيانات مناخية سابقة؛ فإن هناك عدد من الخطوات الجديدة اللازم اتباعها في عملية التصميم لاستخدام تلك الأدوات مع معلمات المناخ المستقبلية. في البداية، يجب اتخاذ قرارات بشأن أي السيناريوهات المناخية المستقبلية اللازم استخدامها، وكم عددها؛ لتحديد مدى الظروف المستقبلية المحتملة على النحو الملائم، ثم ترجمة التوقعات بدرجات الحرارة وهطول الأمطار إلى معاملات على مستوى المشروع، مثل: درجات حرارة الرصف وظروف الرطوبة باستخدام نتائج نموذج المناخ العالمي المصغر- حيثما لزم ذلك-.

ومن المتوقع أن تحدث غالبية التقلبات المتوقعة في المتغيرات البيئية بمعدل بطيء نسبيًا فيما يتعلق بتغيرات دورة الحياة التقليدية للرصف -تغييرات تحدث على مدار عقود- وهو ما يسمح بمراقبة الاتجاهات وإدخال تعديلات على الممارسات الحالية -حيثما لزم ذلك-. ويمكن إجراء مقارنة بين القيم الحالية للطقس والمناخ المستخدمة في التصميم بتلك القيم المتوقعة على امتداد دورة حياة الرصف القائم أو المقترح تنفيذه. وعندما تختلف تلك القيم بصورة كبيرة؛ فإنه يلزم دراسة طرق أخرى لتحديث مدخلات التصميم ذات العلاقة بالمناخ بالبيانات التي تعبر بصورة أفضل عن التوقعات المناخية المستقبلية.

في بعض الحالات، عندما تكون الاتجاهات بطيئة بما يكفي، أو تكون دورات تأهيل الرصف سريعة بما يكفي؛ فإنه ينبغي اتباع نهج أبسط للتأكد من حداثة البيانات السابقة المستخدمة في التحليل (بما في ذلك البيانات المُستخلصة من العقد المنصرم). وبالمثل، هناك نهج آخر يتمثل في مراقبة معلمات رئيسة لأداء الرصف؛ لتحديد ما إذا كانت تُبدي أي اتجاهات تدعو إلى مراجعة وتنقيح الممارسات أم لا. وهذه المؤشرات مفيدة لإدراك الحاجة إلى تعديل التصميم وممارسات الصيانة الحالية، ومتى يحين موعد ذلك؟

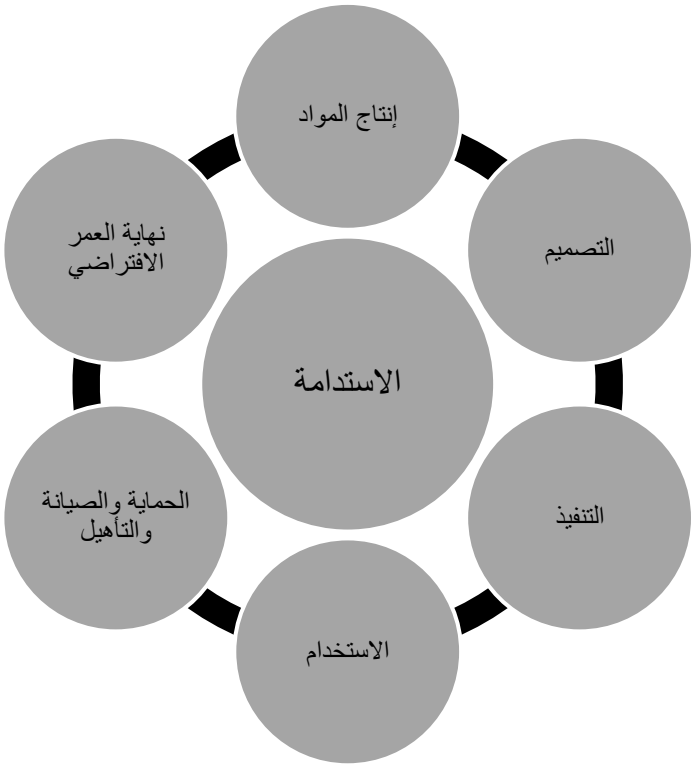
تشتمل الاستراتيجيات الجوهرية لتعديل الرصف بهدف تعويض الزيادة المحتملة في عيوب الرصف نتيجة لارتفاع درجات الحرارة أو التغير في أنماط هطول الأمطار على ما يلي:

- تعديل مادة رابطة للرصف ومواصفات تصميم الخلطة؛ لتتلاءم على نحو أفضل مع الظروف البيئية المتوقعة في المستقبل. فعلى سبيل المثال: استخدام درجة أسفلت أكثر صلابة لتتناسب مع درجات الحرارة الأعلى.
- تعديل التصميم الإنشائي للرصف. بالنسبة للرصف الخرساني على سبيل المثال: يُعد استخدام تصميم قوي يقلص من أضرار الرطوبة والانكماش بديلا جيدًا. ويعد استخدام مواد مستقرة لطبقات الأساس وما تحت الأساس بديلا جيدًا للاستخدام مع لأسس غير المترابطة، وخصوصًا في المناطق التي يحتمل فيها ارتفاع منسوب المياه الجوفية أو التي تشهد تزايدًا في معدلات هطول الأمطار.

٢-١-٢ الاستدامة:

الرصف المستدام هو الرصف القادر على تحقيق غاياته الهندسية المحددة، بينما يحقق ما يلي، على مدى أوسع: (١) يلبي الاحتياجات البشرية الأساسية، (٢) يستخدم الموارد بفعالية، (٣) يحمي وينعش المنظومة البيئية المُحيطة به. وتتميز الاستدامة بحساسيتها للظروف المحيطة؛ لذا فلا يوجد نهج عام وشامل، بل تكون هناك تطبيقات خاصة وفريدة لكل تطبيق للرصف. فضلا عن ذلك، لا يمكن تحقيق تعريف "الرصف المستدام" كما ورد في هذا الباب على نحو كامل. ويعد هذا غاية يُتطلع للعمل لتحقيقها، وتحقيقها لاحقًا في مرحلة ما من المستقبل، فالاستدامة هي أفضل سبيل للرقي.

دُرست ست مراحل أساسية من دورة حياة الرصف؛ لتحقيق أفضل ممارسات الاستدامة، كما هو موضح في الشكل (٢-١) والوصف أدناه.



الشكل (٢–١) مراحل دورة حياة الرصف.

- إنتاج المواد: الأنشطة المساهمة في توفير مواد الرصف (مثل: التعدين واستخراج النفط الخام)، ومعالجتها (مثل: التكرير والتصنيع والمزج)، بما في ذلك عمليات المصانع والنقل.
- تصميم الرصف: عملية تحديد المتطلبات الوظيفية للرصف، وجمع المعلومات ذات الصلة (مثل: القاعدة الترابية وحركة المرور والطقس) ثم اختيار وتوصيف المواد والمكونات الإنشائية للرصف. لم يتناول هذا المجلد تصميم الطرق غير المُعبّدة.
- التنفيذ: العمليات والمعدات المستخدمة لتنفيذ أنظمة الرصف، بما في ذلك جهود الإنشاءات الجديدة أو إعادة الإنشاء.
- الاستخدام: خصائص الرصف (مثل: الخشونة والقساوة/الصلابة والنسيج الكلي) المؤثرة على استهلاك المركبات للطاقة والانبعاثات المترتبة على ذلك، بالإضافة إلى البيئة المحيطة (مثل: بقاء/احتجاز التدفق الهيدروليكي والتلوث، والانبعاثات الجوية، والضوضاء، وسعة/توصيل الحرارة، والقدرة على امتصاص الطاقة الشمسية، والقدرة على امتصاص الصوت).
- الحماية والصيانة والتأهيل: إضافة وسائل المعالجة إلى الرصف الحالي التي تُبطئ من معدل التدهور، أو التي تعالج أحد أوجه القصور الوظيفي أو الإنشائي.
- نهاية العمر الافتراضي: التخلص النهائي من أي جزء من أنظمة الرصف الذي وصل إلى نهاية عمر استخدامه، أو معالجته، أو إعادة تدويره.

تنطوي أفضل ممارسات الاستدامة للمواد على واحد أو أكثر مما يلي:

- الحد من استخدام المواد الخام (حديثة الاستخراج)، بدلًا عن مختلف المواد المعاد تدويرها أو المنتجات المصاحبة أو المخلفات.
- تقليل استخدام المواد الخام من خلال تحسين تصميم الخلطة، وزيادة طول عمرها.
- تقليل أثار إنتاج المواد عن طريق تحسين الكفاءة، والحد من الانبعاثات.

تشتمل أفضل ممارسات استدامة تصميم الرصف على ما يلي:

- اتباع الطريقة الميكانيكية-التجريبية المُحسنة لتصميم الرصف.
- تعظيم استخدام المواد في بُنية الرصف.
- توظيف كل من تحليل التكلفة على مدار العمر (LCCA) وتحليل عمر الاستخدام (LCA) وأنظمة التقييم في عملية تصميم الرصف.
- النظر في التصاميم الخاصة لمعالجة قضايا الاستدامة البارزة.

تشتمل أفضل ممارسات استدامة تنفيذ الرصف على ما يلي:

- تقليل الآثار السلبية المصاحبة لأعمال الإنشاء.
- تعظيم أو تحسين كفاءة أنشطة الإنشاء.
- تحسين جودة الإنشاء.

تشتمل أفضل ممارسات الصيانة والحماية على ما يلي:

- إدراج مقاييس الاستدامة ضمن الأنظمة الحالية لإدارة الأصول.
- فهم تداعيات معالجات الصيانة والحماية على مدار دورة الحياة.
- مزيد من الاستخدام المكثّف لطرق صيانة/حماية الرصف المعروفة بقدرتها على إطالة عمر الرصف، مع الحفاظ على نعومة سطح الرصف.

تشتمل أفضل ممارسات استدامة نهاية العمر على ما يلي:

- النظر في استراتيجيات التصميم والتأهيل والصيانة والحماية التي تتيح استمرار الرصفيات في تأدية وظيفتها دون الحاجة لتفعيل أحد سيناريوهات نهاية العمر.
- تجنّب ردم مواد الرصف القديمة.
- النظر في تقنيات إعادة الاستخدام/التدوير في الموقع.
- النظر في "الاستخدام الأعلى" للمواد المُعاد تدويرها.
- زيادة استخدام المواد المستصلحة في الرصفيات الجديدة.

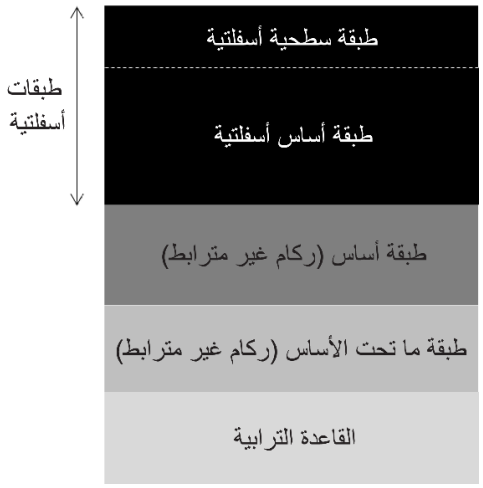
يشرح الباب ١٠ من المجلد الحالي أفضل ممارسات استدامة الرصفيات.

٢-٢ أنواع الرصفيات:

هناك ثلاثة أنواع رئيسة من الرصفيات، هي: الرصفيات المرنة (أو الأسفلتية) ،والصلبة (أو الخرسانية)، والمركبة.

٢-٢-١ الرصفيات المرنة:

بُنية الرصف المرن هي نظام متعدد الطبقات، يتكون عادة من عدة طبقات فوق بعضها، وتوضع المواد ذات الجودة الأفضل -عادةً- على الطبقة العلوية؛ التي تتعرض لأعلى شدة للإجهادات الناتجة من الأحمال المرورية، بينما توضع مواد من جودة أقل في الأسفل؛ حيث تكون شدة الإجهادات قليلة. يتكون المقطع النموذجي للرصف المرن -عادة- من طبقة أو طبقات خرسانة أسفلتية (AC)، وطبقة أساس (base) ركامية وطبقة ما تحت الأساس (subbase) الركامية (الشكل ٢-٢)



الشكل (٢–٢) مقطع عرضي نموذجي للرصف المرن.

تتألف الطبقات الأسفلتية بشكل رئيس من طبقة سطحية أسفلتية وطبقة أساس أسفلتية. طبقة السطح الأسفلتية هي الطبقة العلوية للرصف المرن. ويجب أن تكون قوية لتقاوم التشوهات المترتبة عن حركة المرور، وتوفر سطح حركة ناعم ومقاوم للانزلاق. أما طبقة الأساس

الأسفلتية، فهي الطبقة الإنشائية الرئيسة، حيث تكون الطبقة الأكثر صلابة، وأكبر مساهم في قوة الرصف. وتُصمَّم لتحمل أحمال الحركة المرورية وتوزيعها.

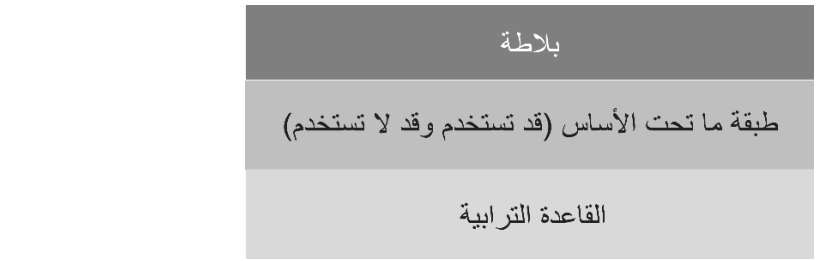
وتوفر طبقة الأساس توزيعًا إضافيًا للأحمال، وتسهم في صرف المياه. ويمكن أن يتألف الأساس من طبقة واحدة أو عدة طبقات مُعالجة بالأسمنت أو الأسفلت أو أي مادة رابطة أخرى، أو يمكن أن تتكون من الركام غير المُعالج. وفي بعض الحالات، يمكن أن يحتوي الأساس على طبقة صرف لصرف المياه المتسربة إلى الأساس. نموذجيًا، يتميز الركام المستخدم في طبقة الأساس بأنه ذو جودة أعلى من ذلك المستخدم في طبقة ما تحت الأساس.

أما طبقة ما تحت الأساس فتكون من الركام غير المترابط أو غير المعالج أو من مادة حبيبية توضع على قاعدة ترابية تأسيسية، أو على منصة عمل للأساس. وتكون وظيفتها الرئيسية هي العمل كدعامة إنشائية؛ لكنها يمكن أن تحد -أيضًا- من اختراق الجسيمات الدقيقة من القاعدة الترابية إلى بُنية الرصف إلى أدنى حد، وتساعد على تحسين صرف المياه. تتكون طبقة ما تحت الأساس -عمومًا- من مواد أقل جودة من مواد الأساس، لكنها تكون أعلى في الجودة من تربة القاعدة الترابية. يمكن أن لا تكون طبقة ما تحت الأساس ضرورية في المناطق التي تتميز بجودة القاعدة الترابية، أو عندما يكون بناء طبقة أساس أكثر سمكًا أكثر فعالية من حيث التكلفة.

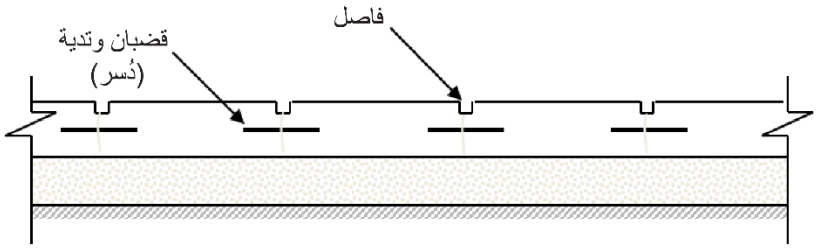
القاعدة الترابية هي جزء من أرضية الطريق الذي يتكون من التربة الأصلية أو المعالجة؛ التي يوضع فوقها طبقات السطح والأساس وما تحت الأساس، أو طبقة من أي مواد أخرى.

٢-٢-٢ الرصفيات الصلبة:

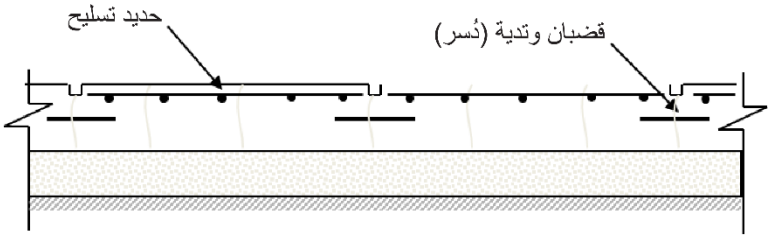
يتكون الرصف الصلب من طبقة خرسانية من الأسمنت البورتلاندي (PCC)، توضع إما مباشرة فوق القاعدة الترابية المجهزة، وإما فوق طبقة واحدة من مادة حبيبية أو مادة مستقرة (طبقة ما تحت الأساس) (الشكل ٢-٣). ويمكن أن تكون طبقة الخرسانة من الخرسانة العادية ذات الفواصل (JPC) (الشكل ٢-٤)، أو الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (JRC) (الشكل ٢-٣)، أو رصف من الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (CRCP) (الشكل ٢-٦).



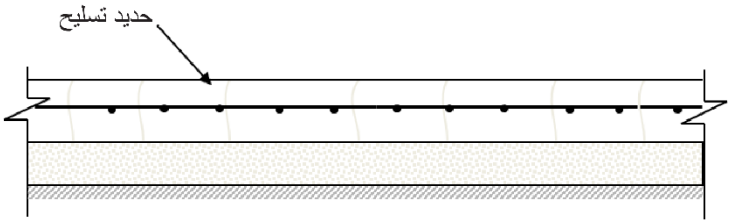
الشكل (٢–٣) مقطع عرضي نموذجي للرصف الصلب.



الشكل (٢–٤) رصف الخرسانة العادية ذو الفواصل (JPCP).



الشكل (٢–٥) رصف الخرسانة المسلحة ذو الفواصل (JRCP).



الشكل (٢–٦) رصف الخرسانة المسلحة المستمر (CRCP).

الطبقة السطحية (البلاطة الخرسانية) هي أصلب طبقة، وتوفر القدر الأكبر من القوة. وتكون طبقات الأساس وما تحت الأساس أقل صلابة بكثير من صلابة الطبقة السطحية المكونة من خرسانة الأسمنت البورتلاندي، لكنها تظل ذات مساهمة مهمة في توفير الدعم المنتظم، وصرف المياه عن الرصف، وتوفر منصة عمل لمعدات الإنشاء.

٢-٢-٣ الرصفيات المركبة:

يجمع الرصف المركب بين الخرسانة الأسفلتية (AC) وخرسانة الأسمنت البورتلاندي (الشكل ٢-٧). يسهم استخدام خرسانة الأسمنت البورتلاندي كطبقة سفلية في توفير قاعدة قوية، بينما توفر الخرسانة الأسفلتية سطحًا أملسًا. إلا أن هذا النوع من الرصف باهظ التكاليف، ونادرًا ما يُستخدَم في الإنشاءات الجديدة؛ حيث يُستخدم الرصف المُركب في تجديد وتأهيل الرصفيات الصلبة بطبقة تكسية أسفلتية (الجزء ٩-٧).



الشكل (٢–٧) مقطع عرضي نموذجي للرصف المركب.

٢-٣ طرق تصميم الرصف:

تُستخدم الطرق الثلاث التالية في التصميم الإنشائي للرصف:

- طرق التصميم التجريبي للرصف.
- طرق التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف.
- المقطع العرضي الثابت السماكة للرصف (القطاعات القياسية) .

تعتمد طرق التصميم التجريبي للرصف حصرًا على نتائج التجارب أو الخبرات السابقة؛ حيث تُستخدم مشاهدات استجابات الرصف لأحمال الحركة المرورية المعلومة وظروف القاعدة الترابية؛ لاستخلاص الارتباطات بين مدخلات تصميم الرصف وأداء الرصف. تكمن الميزة الأساسية في الطرق التجريبية في أنها تتخلص من مشكلة الصياغة النظرية للعلاقة المعقدة بين السبب والنتيجة، بخصوص تصميم الرصف والعيوب المشاهدة فيه. أما العيب الأساسي في طرق التصميم التجريبي للرصف فهو محدودية سريان صحة تلك العلاقات؛ حيث تقتصر على الظروف التي شوهدت في ظلها. ويحتاج إسقاط تلك العلاقات على ظروف أخرى إلى وضع فرضيات من شأنها تقويض دقة الطريقة. ويعد دليل (AASHTO) للتصميم الإنشائي للرصفيات الجديدة أكثر الطرق التجريبية شيوعًا (AASHTO, 1993).

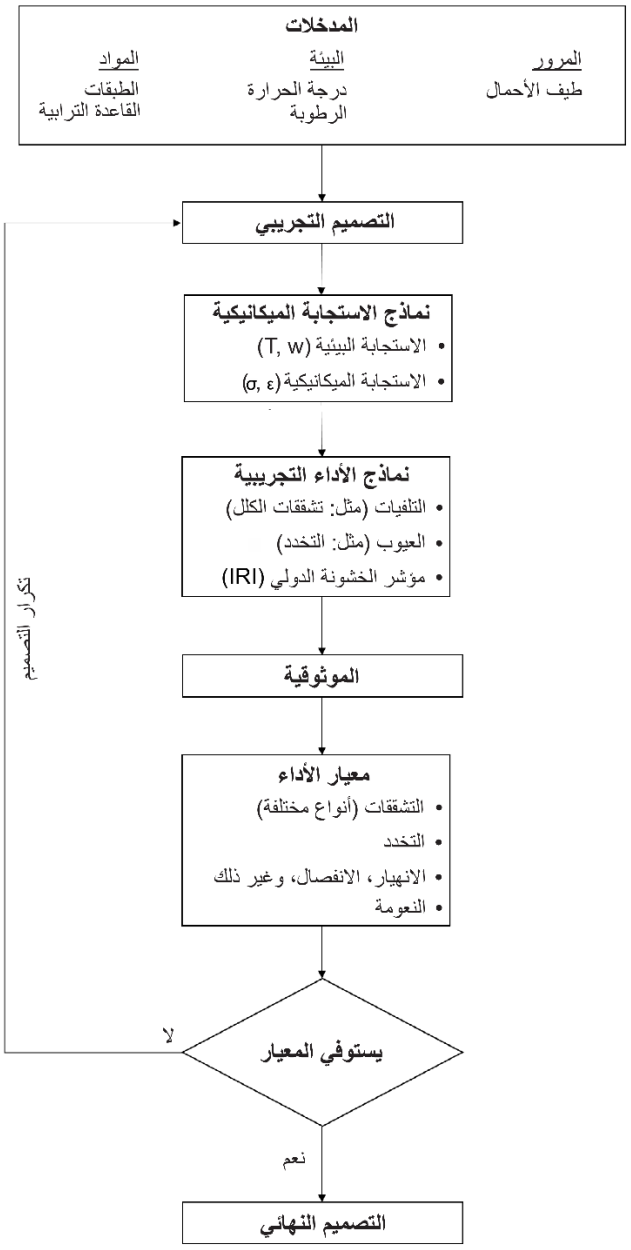
وقد كانت أوجه القصور التي تشوب أسلوب (AASHTO) لتصميم الرصف هي القوة المحركة التي دفعت عجلة العمل على تطوير أساليب التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف الأكثر شمولية.

وبينما تستخدم الطرق الميكانيكية-التجريبية لتصميم الرصف الأكثر تطورًا نظريات الميكانيكيا الهندسية لربط الأحمال المرورية والظروف البيئية بسلوك وأداء بُنية الرصف؛ حيث يحسب الشق الميكانيكي من النموذج الاستجابات الإنشائية للرصف (أي: الإجهادات والانفعالات والانحرافات) الناتجة عن الأحمال المرورية، والظروف البيئية، وخواص المواد. وتُنمذج بنية الرصف كنظام خطي مرن يضم العديد من الطبقات؛ للحصول على الاستجابات الديناميكية لمختلف مواد الرصف. ثم تُربَط استجابات الرصف تلك بمستوى أدائه عبر استخدام نماذج التنبؤ بعيوب الرصف التجريبية. ويمكن أن طُوّرت نماذج التنبؤ بعيوب الرصف التجريبية وعُويرت باستخدام مشاهدات أداء الرصف ميدانيًا. يوضح الشكل (٢-٨) المبادئ الأساسية لطريقة التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف. الطريقة الأشمل للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف هي طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) (AASHTO, 2020)، والتي طُوّرت من قبل البرنامج القومي (الأمريكي) التعاوني لأبحاث الطرق (NCHRP).

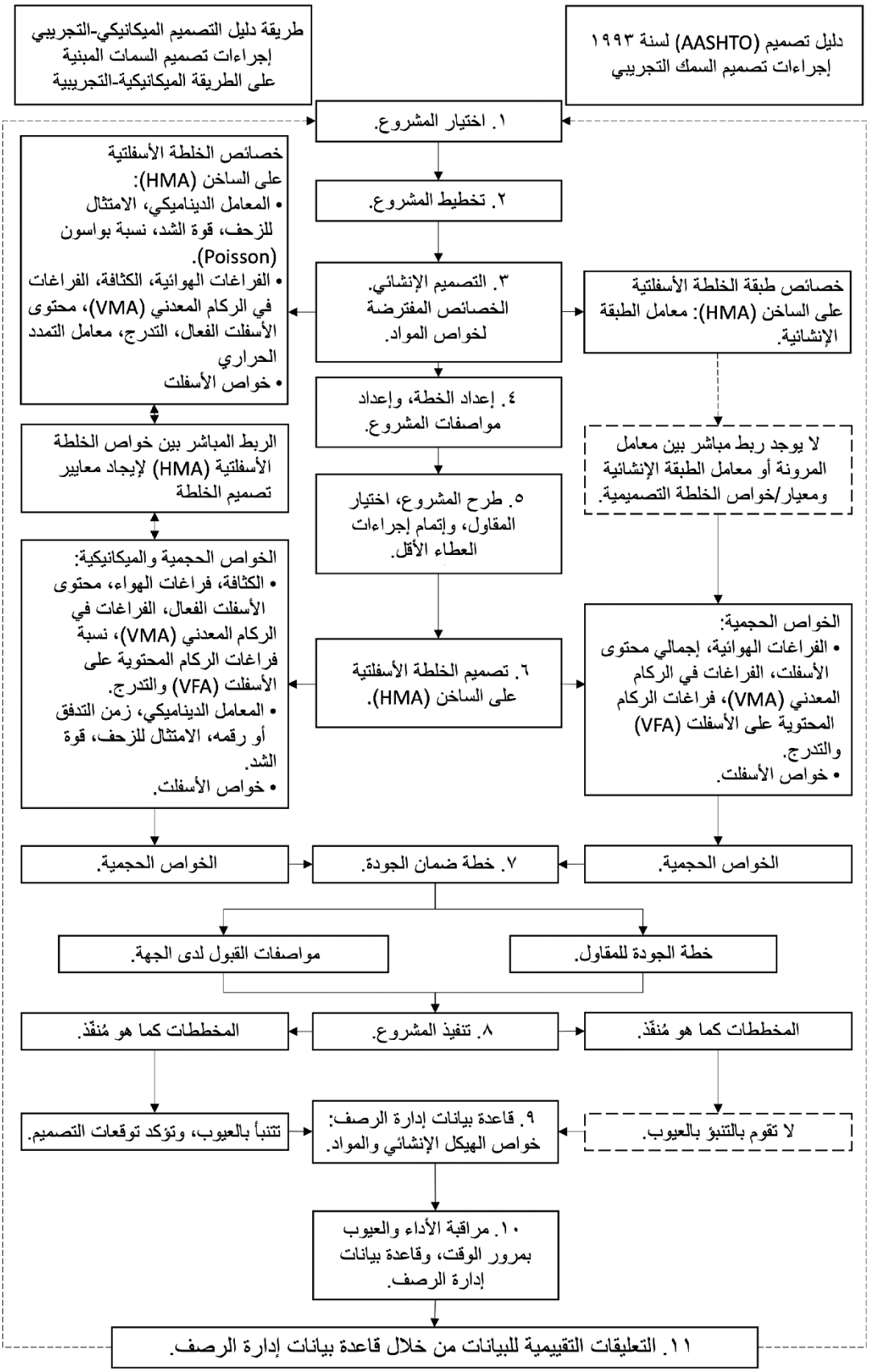
توظف طريقة التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف نهجًا هرميًا بخصوص مدخلات تصميم الرصف. وقد صُممت هذا النهج لتعكس الاعتبارات العملية بأنه يجب أن يتناسب كل من مستوى الجهد وإجمالي التكلفة المصروفة لإتمام تصميم الرصف مع أهمية المشروع والمخاطر المترتبة على الانهيار المبكر للرصف. يستعرض الشكل (٢-٩) الفروق بين طريقة التصميم التجريبي ونظام التصميم الميكانيكي-التجريبي المتكامل من حيث خصائص خلطة الخرسانة الأسفلتية. لُخصّت الفروق الأخرى بين طريقتي التصميم في الجدول (٢-١).

تتطلب طريقة التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف -أيضًا- قدرًا كبيرًا من مدخلات التصميم بمستوى أعلى بكثير من التفاصيل مقارنة بطريقة (AASHTO) لعام ١٩٩٣، حتى عند استخدام المستوى ٣ من المدخلات. ويكون التحدي الرئيس الذي يواجه جهات النقل في تطبيق طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف هو تطوير الاستراتيجيات اللازمة لتعديل الطرق الحالية لجمع البيانات وحفظها، بما يعكس البيانات اللازمة لتصميم الرصف باتباع هذه الطريقة. ويشتمل ذلك على ترتيب أولويات البيانات من حيث أيها أكثر أهمية وفاعلية من حيث التكلفة لجمعها، وأي المدخلات يمكن تحديدها عند مستويات أدنى من المدخلات بدون الإخلال بأداء الرصف. ومن التحديات الأخرى التي تواجه الجهات الساعية إلى تطبيق طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف: الحاجة إلى إثبات صحة النماذج التجريبية لعيوب الرصف، ومعايرتها، وترسيخها، بما يعبّر عن الظروف المحلية. وقد عُويرت النماذج التجريبية لعيوب الرصف، التي تربط بين الاستجابات الإنشائية والبيئية في طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف باستخدام بيانات تُجمع بصفة أساسية من قاعدة بيانات أداء الرصف على المدى الطويل(LTPP) ؛ لذا قد لا تكون معبرة عن أنماط التحميل المروري والظروف المناخية والمواد وطرق الإنشاء لكل جهة نقل محلية. ويجب على جهات النقل المحلية في البداية تحديد مدى ملاءمة نماذج طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف المعايرة على المستوى الوطني لتعكس الظروف المحلية، وإعادة المعايرة والتحقق من صحة النماذج - إذا لزم الأمر- في ضوء الظروف المحلية .

وحتى إنجاز إجراءات المعايرة والتحقق من نماذج طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف الضرورية، يمكن استخدام المقطع العرضي الثابت سماكة الرصف المدرج في المجلد الحالي. ويقترح تطبيق طريقة (AASHTO) التجريبية لتصميم الرصف، لعام ١٩٩٣م، في حالات الأحجام المرورية المنخفضة للمركبات الثقيلة (مخصص للمركبات الخفيفة والخفيفة جدًا).



الشكل (٢–٨) طريقة التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020).



الشكل (٢–٩) الفروق النمطية بين طريقة التصميم التجريبي ونظام التصميم الميكانيكي-التجريبي المتكامل، من حيث خصائص خلطة الخرسانة الأسفلتية (AASHTO, 2020) (AC).

الجدول (٢–١) الفروق النمطية بين طريقة التصميم التجريبي ونظام التصميم الميكانيكي-التجريبي المتكامل.

العوامل	طريقة (AASHTO) التجريبية لعام ١٩٩٣	طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي
البيئية	• المعامِلات الموسمية للقاعدة الترابية للأخذ في الاعتبار الرطوبة (القسم الفرعي ٥-٢-٦-١). • معاملات الصرف (القسم الفرعي ٥-٢-٦-٥). • معامل طبقات الأسفلت فقط عند ٢٠ درجة مئوية (الجزء الفرعي ٥-٢-٧).	بيانات مناخية مفصلة (الجزء الفرعي ٥-٣-٦): • درجة الحرارة في كل ساعة. • تساقط الأمطار. • سرعة الرياح. • الرطوبة النسبية. • غطاء السُّحب.
المرور	مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) (الجزء الفرعي ٥-٢-٤)	بيانات طيف الحمل المحوري (الجزء الفرعي ٥-٣-٥)
التربة	معامل المرونة (M_R) (القسم الفرعي ٥-٢-٦-١).	• الكثافة الجافة. • محتوى الرطوبة. • خواص التصنيف. • معامل المرونة. (القسم الفرعي ٥-٣-٧-٢)

وبالنسبة لطريقة تصميم رصف المقطع القياسي، تُختار الطريقة الملائمة لتصميم الرصف لمجموعة محددة من ظروف التصميم بناءً على خبرات الأداء السابقة و/أو الطرق التحليلية. وتكمن القيود الأساسية التي تعاني منها تلك الطرق في عدم إمكانية تطبيقها سوى على المجموعة المُحددة من الظروف، والتي طوّرت في ظلها. يعتمد تصميم المقطع الثابت سماكة الرصف في هذا المجلد على منهجية التصميم التحليلي؛ حيث يجمع بين نظرية الطبقات المتعددة، والمبادئ الأساسية لطريقة معهد الأسفلت. وتعتمد جميع الفرضيات المطروحة وطريقة التصميم المتبعة على الظروف والأوضاع المحلية.

٣- مواد الرصف:

٣-١ مواد القاعدة الترابية:

يشير مصطلح مواد القاعدة الترابية بصفة أساسية إلى مواد التربة المُستخدمة لتشكيل طبقة يتم تشييد الهيكل الإنشائي للرصف فوقها. ويُشار إلى القاعدة الترابية أحيانًا بمصطلح التربة التأسيسية للهيكل الإنشائي للرصف. والهدف من القاعدة الترابية هو حماية التربة الطبيعية من التشوهات المفرطة.

٣-١-١ أنواع القاعدة الترابية:

يضم التصنيف النموذجي للقاعدة الترابية ما يلي: (أ) قاعدة ترابية غير مُعالجة، (ب) قاعدة ترابية مُعالجة بالجير، (ج) قاعدة ترابية معالجة بالأسمنت.

تُوصَف تربة القاعدة الترابية بترتيب تنازلي تبعًا لحجم حبيباتها. وفي ضوء ذلك تتراوح الأنواع القياسية للتربة المستخدمة في القاعدة الترابية من الطين اللين حتى الرمال الخشنة أو الحصى. ونظرًا للتنوع في خصائص مواد التربة غير المُعالجة، فتُصنّف عادة وفقًا لخصائصها الطبيعية، بما في ذلك خصائص التدرّج وأدائها في مقاومة وجود الرطوبة، والي يُعبر عنها بمصطلح "حدود أتيربيرج" (Atterberg limits) (انظر أيضًا الجزء الفرعي ٣-١-٣). يتوافق تصنيف أنواع التربة وفقًا لمنهجية (AASHTO) (الجدول ٣-١) مع مواصفتها رقم (AASHTO M145) (MRDTM 210) تؤثر الأنواع المختلفة من التربة على الخصائص الميكانيكية للقاعدة الترابية للرصف، وقدرة تحملها أو قوتها. وبصفة عامة يكون الرمل أقوى من الطمي، والطمي أقوى من الطين. ومن حيث تصميم الرصف؛ فعادة ما تؤدي القاعدة الترابية الضعيفة إلى تنفيذ الهيكل الإنشائي للرصف بسمك أكبر مقارنة بالقاعدة الترابية القوية عند نفس الحجم المروري.

الجدول (٣–١) نظام (AASHTO) لتصنيف التربة.

التصنيف العام	المواد الحبيبية							المواد الطمية-الطينية				
	مرور ٣٥٪ أو أقل من المنخل رقم ٢٠٠ (٠,٠٧٥ مم)							مرور أكثر من ٣٥٪ من المنخل رقم ٢٠٠ (٠,٠٧٥ مم)				
تصنيف المجموعة	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
تحليل المنخل:												
النسبة المارّة من المنخل:												
رقم ١٠ (٢,٠٠ مم)	٥٠ كحد أقصى											
رقم ٤٠ (٠,٤٢٥ مم)	٣٠ كحد أقصى	٥٠ كحد أقصى	٥١ كحد أقصى									
رقم ٢٠٠ (٠,٠٧٥ مم)	١٥ كحد أقصى	٢٥ كحد أقصى	١٠ كحد أقصى	٣٥ كحد أقصى	٣٥ كحد أقصى	٣٥ كحد أقصى	٣٥ كحد أقصى	٣٦ كحد أدنى	٣٦ كحد أدنى	٣٦ كحد أدنى	٣٦ كحد أدنى	٣٦ كحد أدنى
خصائص الجزء المار من المنخل رقم ٤٠ (٠,٤٢٥ مم):												
حد السيولة				٤٠ كحد أقصى	٤١ كحد أدنى	٤٠ كحد أقصى	٤١ كحد أدنى	٤٠ كحد أقصى	٤١ كحد أدنى	٤٠ كحد أقصى	٤١ كحد أدنى	٤١ كحد أدنى
حد اللدونة	٦ كحد أقصى		لا يوجد	١٠ كحد أقصى	١٠ كحد أقصى	١١ كحد أدنى	١١ كحد أدنى	١٠ كحد أقصى	١٠ كحد أقصى	١١ كحد أدنى	١١ كحد أدنى*	١١ كحد أدنى**
الأنواع المعتادة من المكونات الوفيرة	كسر الأحجار والحصى والرمل		رمل ناعم	رمل وحصى به نسبة من الطمي والطين				تربة طمية		تربة طينة		
التصنيف العام للقاعدة الترابية	ممتازة إلى جيدة							مقبولة إلى رديئة				
* إذا كان مؤشر اللدونة يساوي أو أقل من (حد السيولة - ٣٠)، تكون التربة A-7-5 (أي: حد اللدونة أكبر من ٣٠٪)												
** إذا كان مؤشر اللدونة أكبر من (حد السيولة - ٣٠)، تكون التربة A-7-6 (حد اللدونة أقل من ٣٠٪)												

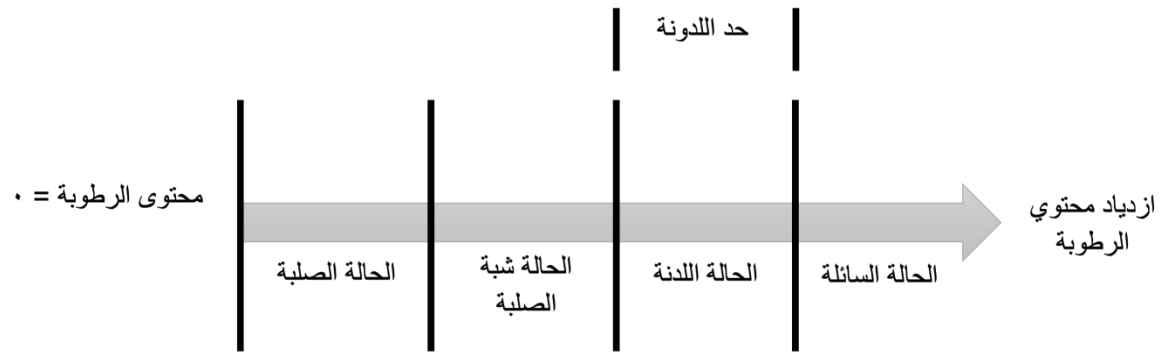
تُستخدم القاعدة الترابية المعالجة بالجير؛ للتعامل مع احتمالية الانتفاخ لأنوع التربة الانتفاخية. ويجب أن يتوافق الجير المستخدم لمعالجة التربة مع متطلبات مواصفة (ASTM C51). وبالنسبة للقاعدة الترابية المُعالجة بالأسمنت؛ فيجب أن تستوفي التربة بعض المتطلبات، ومنها على سبيل المثال: التأكد من ملاءمة المعالجة بالأسمنت للتربة التي يقل حد لدونتها عن ٢٠. ويجب أن تتوافق خرسانة الأسمنت البورتلاندي (PCC) مع مواصفة (AASHTO M85) (SASO ASTM 150M) للمزيد من المعلومات حول أنواع القاعدة الترابية ومتطلباتها، يُرجى الاطلاع على الجزء (٢-٧) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق).

٣-١-٢ تحليل المنخل:

تحليل التدرج أو تحليل المنخل هو أول وأهم إجراء يُنفَّذ للتعرف على خصائص التربة وفقًا لمواصفة (AASHTO T88) (MRDTM 205)، ويعطي تقسيم النسب المئوية لأحجام حبيبات التربة محل الاختبار. حيث تمر التربة عبر مناخل بها فتحات بمقاسات مختلفة. وكلما انخفض رقم المنخل، كان حجم الجزيئات أكبر. يعمل المنخل رقم ٢٠٠ (مقاس فتحاته ٧٥ ميكرو متر) على فصل جزئيات الرمل عن جزئيات الطمي والطين. وبمجرد توفر إمكانية رسم منحنى التدرج، يمكن إجراء تصنيف للتربة باتباع معايير التدرج وحدود أتيربيرج (انظر الجزء الفرعي ٣-١-٣) من مواصفة (AASHTO M145) (MRDTM 210).

٣-١-٣ حدود أتيربيرج:

يساعد تحديد حدود أتيربيرج من خلال الطرق المعملية المنصوص عليها في مواصفتي (AASHTO T89, T90) (MRDTM 208, 209) في تصنيف التربة أيضًا. يوضح الشكل (٣-١) كيفية أداء تربة نمطية بالنسب المُختلفة من الرطوبة.



الشكل (٣–١) توضيح لحدود أتيربيرج.

يعبر كل من حد الانكماش (SL)، وحد اللدونة (PL) وحد السيولة (LL) عن النسب المئوية للماء التي يتغير عندها سلوك التربة من حالة إلى أخرى وفقًا لما هو موضح في الشكل (٣-١). يعتمد التصنيف عادة على حد اللدونة وحد السيولة، بالإضافة إلى مؤشر أخر، وهو حاصل طرح حد اللدونة من حد السيولة، والذي يعرف باسم مؤشر اللدونة (PI)؛ أي (PI=LL-PL).

٣-١-٤ الكثافة:

دمك (رصّ) التربة أمر ضروري لتجهيز طبقة قاعدة ترابية للرصف تتمتع بالقوة الكافية والحساسية المنخفضة تجاه الهبوط بفعل أحمال عجلات المركبات. ويُقيَّم الدمك بمستوى كثافة التربة المتحقق. وردت التفاصيل الكاملة لعملية الدمك في مواصفة (AASHTO T99 أو T180) (MRDTM 212) والمعروف باسم "اختبار بروكتور" و"اختبار بروكتور المُحسن"، على الترتيب. تُدمك عينات من التربة غير المعالجة عند مستويات مختلفة من الرطوبة؛ ليمكن رسم منحنى العلاقة بين الكثافة والرطوبة. ويتوقع الوصول إلى أقصى كثافة جافة عند محتوى الرطوبة الأمثل، وهي القيمة الحرجة لتجهيز عينات إضافية من التربة في بيئة المختبر؛ لتخضع إلى اختبارات ميكانيكية إضافية، مثل طريقة اختبار تحديد نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR). فالأخيرة مهمة لاستخلاص قيم القوة التصميمية للتربة.

٣-١-٥ حساب قوة القاعدة الترابية:

تنطوي عملية تحديد قوة القاعدة الترابية على شراء المواد المستهدف استخدامها في إنشاء القاعدة الترابية التي تُخضع لاختبارات معملية و/أو استقصاء عينة من المواد من خلال الفحوصات الابتدائية بالموقع بالقرب من منطقة المشروع، والتي تخضع للاختبار في مكانها. وتشتمل مؤشرات القوة الشائعة على ما يلي:

- نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR): تحديد نسبة تحمل كاليفورنيا هو عملية اختبار معملي، تهدف بصفة أساسية –على سبيل المثال لا الحصر– إلى تقييم قوة المواد المتماسكة وغير المُثبّتة والتي يقل الحد الأقصى لحجم جزئياتها عن ١٩ مم. ورد وصف إجراءات المعمل في مواصفة (AASHTO T193) (MRDTM 213). يُعبَّر عن قوة التربة من حيث نسبة تحمل كاليفورنيا على مقياس عددي، يتراوح بين صفر نسبة تحمل كاليفورنيا، الذي يعني أن التربة لا تتمتع بأي قوّة حتى ١٠٠ أو أكثر، ويعني أن التربة تتمتع بقوة مرتفعة. تقع قيمة نسبة تحمل كاليفورنيا لمعظم أنواع التربة بين ١ إلى ٣٠ (١ - ١٥ للطين والطمي، و١٠ - ٣٠ للرمل)، ولكن يجب النظر في استخدام القيم التي تتجاوز ٥٪ عند تصميم الرصف.
- معامل المرونة (M_R): ينحرف السلوك النمطي للتربة عن حالة المرونة الخطية؛ لذا يُستعاض عن معامل يونغ (E) بمعامل المرونة (M_R) والذي يقوم على الانفعال (strain) القابل للرجوع والذي يوقعه الحمل. وتُحدَّد قيمة المعامل (M_R) من خلال تكرار اختبار الانضغاط ثلاثي المحاور في بيئة معملية، وقد ورد وصف هذه العملية في مواصفة (AASHTO T307). يُعد المعامل (M_R) من المدخلات المهمة في عملية تصميم الرصف والمتعلقة بقوة مواد التربة (والحبيبات) وفقًا لما نص عليه دليل (AASHTO) للتصميم، وهو مؤشر يركز بصورة أكبر على الخصائص الميكانيكية للتربة مقارنة بنسبة تحمل كاليفورنيا. تتطلب الإجراءات المعملية لتحديد المعامل (M_R) استخدام معدات متخصصة وتستهلك عادة الكثير من الوقت. وأدى هذا إلى استخدام طرق بديلة لتقدير قيمة المعامل (M_R). في معظم الحالات، تُقدَّر قيمة المعامل (M_R) من خلال الارتباط التجريبي مع نسبة تحمل كاليفورنيا، والتي يمكن أن تتباين في شكلها تبعًا لنوعية التربة وخصائصها (انظر الباب ٥). وبصفة عامة، يمكن أن تتراوح القيم المُعتادة للمعامل (M_R) بين ٧ ميجا باسكال (7 MPa) (الطمي الضعيف) حتى ١٤٠ ميجا باسكال (140 MPa) (الرمل القوي).
- اختبار لوح التحميل: هذا الاختبار هو عملية تُنفَّذ بالموقع، وتنطوي على تسليط ضغط على سطح القاعدة السفلية باستخدام لوح تحميل (الشكل ٣-٢) يتسبب في حدوث انحراف أسفل اللوح. يُنتِج هذا الاختبار قيمة معامل رد فعل القاعدة الترابية (k) كيلو باسكال/م (KPa/m) الذي يُعد عادة كمؤشر لقوة التربة عند تصميم الهيكل الإنشائي للرصف الصلب. ورد وصف هذه العملية في مواصفة (AASHTO T222). وهناك أيضًا علاقة نظرية للارتباط بين المعامل (k) والمعامل (M_R) في دليل (AASHTO) ١٩٩٣ للتصميم؛ حيث ينص على أن ($k=M_R/19.4$)؛ حيث يُعبَّر عن قيم كل من (k) و (M_R) بوحدات الرطل لكل بوصة مكعبة (pci) والرطل لكل بوصة مربعة (psi)، على الترتيب.



الشكل (٣–٢) اختبار لوح التحميل لتربة القاعدة الترابية.

٣-١-٦ صرف مياه القاعدة الترابية:

تتسبب الطرق عادة في مقاطعة الصرف الطبيعي للمياه إلى أحواضها. ويجب أيضًا صرف المياه المتساقطة على أكتاف الطريق وميول القطع والردم؛ لذا تقتضي الحاجة وجود عبارات وخنادق لنقل مياه الأمطار من جانب المنبع إلى جانب المصب لحوض الصرف. ترد متطلبات أنظمة صرف مياه الأمطار في الباب (٦)من كود الطرق السعودي ٣٠٢ (الهيدرولوجيا والتصميم الهيدروليكي).

فضلا عن ذلك، يهدد وجود مياه الأمطار في القاعدة الترابية سلامة الرصف. وحتى في الحالات التي تنخفض معها احتمالية هطول الأمطار، يقتضي ارتفاع مستوى المياه الجوفية المقترن مع القاعدة الترابية غير الحبيبية ضرورة توفر صرف في القاعدة الترابية. ويؤدي ضعف الصرف في أنواع التربة ذات الحبيبات الدقيقة إلى إضعاف قوة القاعدة الترابية ويتسبب في حدوث تشوه دائم، وفقدان قوة الدعم. فضلا عن ذلك، يشكل صرف المياه من أعلى وأسفل الرصف اعتبارًا مهمًا في تصميم الرصف؛ لذا يُنظر في قدرة المواد

المستخدمة على صرف المياه أثناء تصميم الرصف، باستخدام معاملات الطبقة المعدلة ذات العلاقة بجودة الصرف (انظر أيضًا الجدول (٥-١٠) والنسبة المئوية من الوقت التي يتعرض فيها الرصف لمستويات رطوبة تقترب من نقطة التشبّع (انظر أيضًا الجدول ٥-١١).

ويجب إنشاء طبقة الترشيح المحيطة بأنابيب المصرف السفلي باستخدام مواد ركام حرة الصرف، والتي تسمح بتسرّب المياه وتمنع عبور جزئيات التربة ووصولها إلى الأنابيب. ويجب ألا تقل الكثافة الكلية للركام عن ٢,٣٥٠ كجم/م^3، ويجب ألا تتجاوز نسبة امتصاص المياه ٢,٥٪، ويجب ألا تتجاوز نسبة البري وفقًا لاختبار لوس أنجلوس قيمة ٤٠٪. كما يجب أن تتمتع طبقة الترشيح بمعامل تدرج جيد، ويكون مؤشر التجانس لها (D_{60}/D_{10}) أقل من أو يساوي ٢٠ ($D_{60}/D_{10} \leq 20$)، حيث أن (D_{60}) و (D_{10}) هي فتحات المنخل التي يمر من خلالها ٦٠٪ و ١٠٪ من تربة الترشيح المحيطة، على الترتيب. يعرض الجدول (٣-٢) حدود تدرج الركام لطبقة الترشيح.

الجدول (٣–٢) تدرج مواد طبقة ترشيح المصرف السفلي.

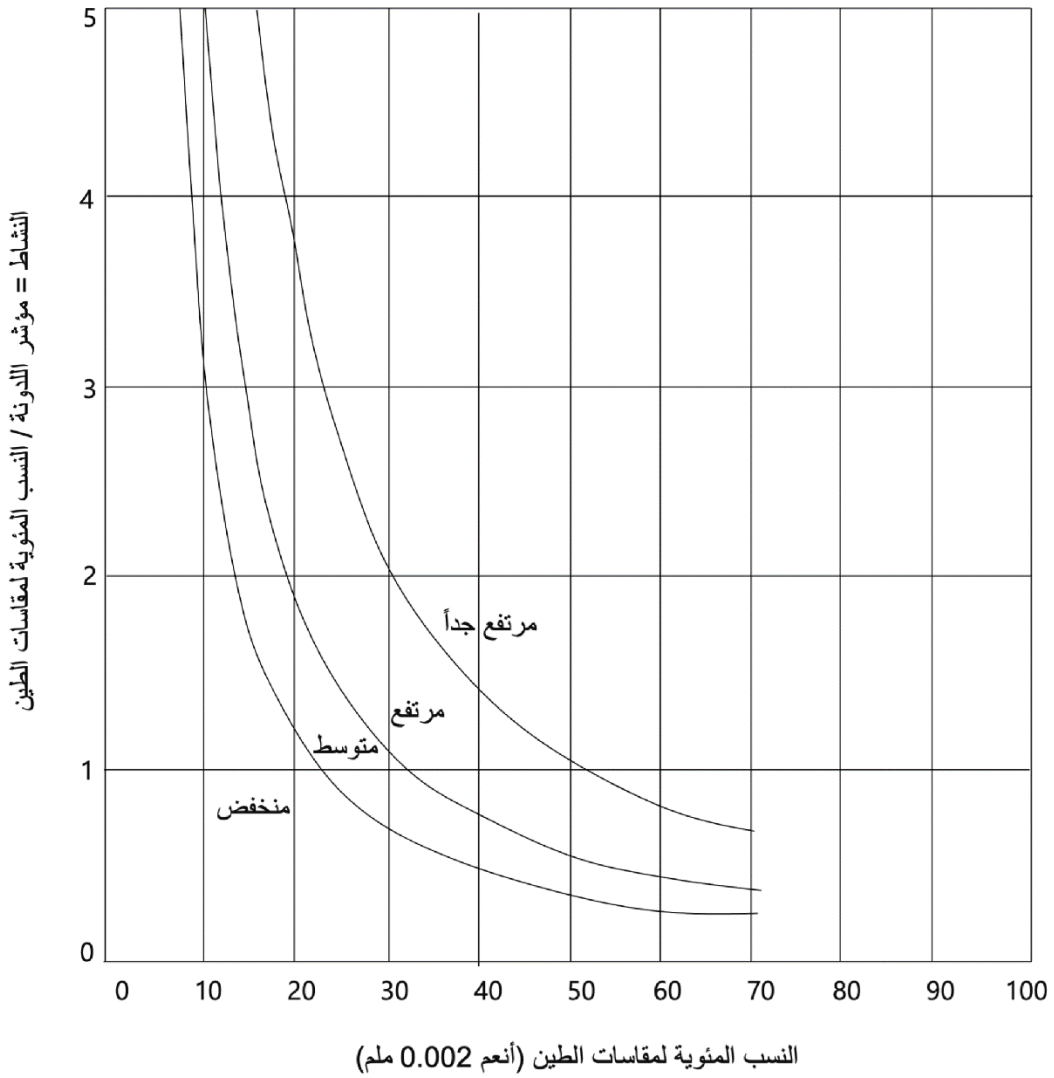
مقاس المنخل (ملم)	النسبة المئوية المارّة بالوزن
٣٧,٥ (١,٥ بوصة)	١٠٠
٢٥,٤ (١ بوصة)	٩٥ – ١٠٠
١٢,٥ (٠,٥ بوصة)	٢٥ – ٦٠
٤,٧٥ (رقم ٤)	٠ – ١٠
٢,٣٦ (رقم ٨)	٠ - ٥
٢ (رقم ١٠)	٠ – ٢

٣-١-٧ تحسين القاعدة الترابية:

يمكن أن تُظهر بعض أنواع التربة سلوكًا غير مُرضٍ عند وجود الرطوبة؛ حيث تتعرض لبعض التغييرات في الحجم، مثل الانكماش أو الانتفاخ. ويظهر ذلك بصفة أساسية في الطبقات الطينية التي تتعرض لارتفاع مستوى المياه الجوفية، عند تغير مستويات الرطوبة بها. وقد اشتهر وجود أنواع التربة الانتفاخية في أنحاء عديدة من المملكة. وقد تناولت مواصفة (AASHTO T258) عملية التصنيف اللازم للتنبؤ بإمكانية انتفاخ تربة القاعدة الترابية، ويوضحها الشكل (٣-٣).

تتسبب القاعدة الترابية الرديئة في تعريض الرصف إلى الانهيار المبكر بصرف النظر عن إجمالي سُمكه. فلا يشكل مجرد تصميم طبقة أكثر سُمكًا من الرصف فوق طبقة قاعدة ترابية رديئة حلًا للمشكلة. فضلًا عن ذلك، يمكن أن يتناقض -أيضًا- التصميم السميك للرصف مع المتطلبات الهندسية (الجيومترية) للطريق؛ لذا يلزم حماية القاعدة الترابية بتحسين أدائها، إذا كان من المستحيل تجنّب إنشاء الرصف فوق تربة ضعيفة ولينة. وتجدر ملحوظة، أنه في أثناء تشييد الرصف يمكن أن تتعرض القاعدة الترابية لفرط الانفعال بسبب حركة مرور معدات الإنشاء المستخدمة لإنشاء الهيكل الإنشائي للرصف. فإذا كانت نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية الحالية بقيمة ٥ أو أقل بعد استخدام طرق الدمك (الرّص) القياسية، بما في ذلك الصرف؛ فيمكن حينها اتباع أساليب تحسين التربة المُثبّتة؛ حيث يُسهم تحسين التربة في رفع قيمة نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية، وتقليص سُمك طبقة ما تحت الأساس. تشتمل أكثر الأساليب المُعتادة لتحسين القاعدة الترابية على ما يلي:

١- الإزالة والاستبدال (أي: الحفر الزائد)؛ حيث تُحفَر وتُزال التربة الرديئة حتى عمق مُحدد، وتُستبدَل بمواد ردم أعلى في الجودة. وهي عملية بسيطة من حيث المفهوم؛ لكنها يمكن أن تتطلب عمالة كثيفة وتكلفة باهظة لضمان الحصول على أساس تدعيم مناسب للرصف.
٢- الثبيت (انظر الجزء الفرعي ٣-١-٨).
٣- استخدام أساليب التسليح باستخدام الشبكات الصناعية الأرضية (Geogrids)، والتكسيات النسيجية الأرضية (Geotextiles) (انظر الجزء الفرعي ٣-١-٩).



الشكل (٣–٣) مخطط تصنيف احتمالية الانتفاخ.

٣-١-٨ تثبيت ما تحت الأساس:

يمكن تثبيت التربة باستخدام الجير والأسمنت والرماد المتطاير ومواد أخرى. يجب أن يتوافق استخدام الجير لمعالجة التربة مع متطلبات القسم الفرعي (٢-٧-٢-٢) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق). ويجب أن يتوافق استخدام الأسمنت مع متطلبات القسم الفرعي (٢-٧-٢-٣) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق). ويجب أن يتوافق استخدام الرماد المتطاير مع متطلبات القسم الفرعي (٢-٧-٢-٤) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق). ويجب أن يتوافق استخدام المواد الأسمنتية مع متطلبات القسم الفرعي (٢-٧-٢-٥-٣) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق). يمكن النظر في استخدام مواد أخرى، مثل البوليمرات، وفقًا للمواصفة (SASO 3026).

٣-١-٩ الشبكات الصناعية الأرضية (Geogrids)، والتكسيات النسيجية الأرضية (Geotextiles)، وخلايا الاحتواء الأرضية (Geocells):

يجب أن يتوافق استخدام الشبكات الصناعية الأرضية، والتكسيات النسيجية الأرضية، وخلايا الاحتواء الأرضية مع متطلبات القسم الفرعي (٢-٧-٢-٥-٢) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق).

٣-٢ الركام غير المترابط (المُخلخل):

٣-٢-١ الركام المستخدم في طبقات الأساس:

٣-٢-١-١ متطلبات الجودة :

يجب أن يكون الركام المستخدم في طبقة الأساس من الصخور المكسّرة، أو الخبث المُكسّر، أو الحصى المُكسّر، أو الرمل، أو مزيج من تلك المواد. يطلق مصطلح (مُكسّر) على الركام الذي يُنتَج بتكسير الصخور أو الأحجار أو الحصى ذات الأحجام الكبيرة في المحاجر. ويُستخرَج -عادة- الحصى أو الرمل الطبيعي بالحفر أو التجريف من حفرة أو نهر أو بحيرة أو من قاع البحر. ومن هذا المنظور تتميز الصخور أو الحصى المكسّرة بأداء جيد في الاستخدامات التي يساعد فيها الاحتكاك بين الجزئيات (بسبب أشكالها الزاوّية) على تقوية الرصف، مثل طبقات الأساس الحبيبية. يوضح الجدول (٣-٣) متطلبات الجودة اللازم توفرها في خلطات الأساس من الركام غير المعالج. مع مراعاة ما يلي:

- يجب استخدام الركام من الفئة (أ) في الطرق الشريانية والطرق السريعة والطرق شبه السريعة والمناطق الصناعية ومناطق وقوف المركبات الثقيلة.
- يجب استخدام الركام من الفئة (ب) في الطرق التجميعية.
- يجب استخدام الركام من الفئة (ج) في الطرق الفرعية داخل المناطق السكنية.

الجدول (٣–٣) متطلبات الجودة لخلطات طبقات الأساس.

متطلبات الجودة	طريقة الاختبار	القيم وفقًا للتصنيف		
		الفئة أ	الفئة ب	الفئة ج
زاويّة الركام لوجهين مكسورين، الحد الأدنى، ٪	ASTM D5821	٨٠[١]	٧٠[١]	٥٠[١]
المتانة في كبريتات الصوديوم، خمس دورات، الحد الأقصى، ٪ [٢]	AASHTO T104	١٢	١٨	٢٤
اختبار لوس أنجلوس للبري، الحد الأقصى، ٪	ASTM C535	٤٠	٤٥	٥٠
مكافئ الرمل، الحد الأدنى، ٪	AASHTO T176	٤٥	٣٥	٢٥
حد السيولة، الحد الأقصى، ٪	AASHTO T89	٢٥		
مؤشر اللدونة، الحد الأقصى، ٪	AASHTO T90	٦		
التمدد، ٪ [٣]	ASTM D4792	٠,٥ كحد أقصى		
نسبة تحمل كاليفورنيا، الحد الأدنى، ٪	AASHTO T193	١٠٠	٨٠	٦٥

ملحوظات:

١- يُعدّل هذا المتطلب عند توصيفه في وثائق العقد، مما ينص على استخدام طريقة أخرى لقياس الاحتكاك بين الجزيئات ثبت ارتباطها بالأداء الميداني الجيد.

٢- يمكن تعديل هذا الشرط بناءً على تبرير المهندس وموافقته.

٣- إجراء اختبارات الركام التي تحتوي على مكونات عرضة للترطيب، مثل خبث الحديد.

٣-٢-١-٢ التدرج

يوضح الجدول (٣-٤) متطلبات التدرج والجودة اللازم توفرها في خلطات الأساس من الركام غير المعالج. لاحظ أن جزء الخلطة النهائية الذي يمر من المنخل ٧٥ مايكرومتر (رقم ٢٠٠) يجب ألا يتجاوز ٦٠٪ من الجزء الذي يمر عبر منخل ٦٠٠ مايكرومتر (رقم ٣٠).

الجدول (٣–٤) متطلبات التدرج لخلطات طبقات الأساس.

مقاس المنخل (ملم)	النسبة المئوية المارّة بالوزن		
	الفئة أ	الفئة ب	الفئة ج
٥٠ (٢ بوصة)	١٠٠		
٣٧,٥ (١,٥ بوصة)	١٠٠ – ٩٧	١٠٠	
٢٥ (١ بوصة)		١٠٠ - ٩٧	١٠٠
١٩,٠ (٠,٧٥ بوصة)	٨١ – ٦٧		١٠٠ - ٩٧
٩,٥ (٨١٣ بوصة)		٧٠ - ٥٦	٧٩ - ٦٧
٤,٧٥ (رقم ٤)	٤٧ – ٣٣	٥٣ - ٣٩	٥٩ - ٤٧
٠,٤٢٥ (رقم ٤٠)	١٩- ١٠	٢١ - ١٢	٢١ - ١٢
٠,٠٧٥ (رقم ٢٠٠)	٨ – ٤	٨ - ٤	٨ - ٤
يجب ألا تتجاوز نسبة المادة المارة من المنخل رقم ٢٠٠ (٠,٠٧٥ مم) نصف الكمية المارة من المنخل رقم ٤٠ (٠,٤٢٥ مم).			

عندما تقتضي المواصفات استخدام ركام مفتوح التدرج، فيجب أن تتوافق مع أحد التدرجات الواردة في الجدول (٣-٥) على أن تكون جودة المواد من الفئة (أ) الموضحة في الجدول (٣-٣). ويجب معالجة المواد مفتوحة التدرج، عند إنشاء الطرق والشوارع الرئيسة، وطرق المناطق الصناعية ومناطق وقوف المركبات الثقيلة، بالأسمنت أو أي طريقة أخرى منصوص عليها في المواصفات الخاصة أو الدراسة الفنية.

الجدول (٣–٥) التدرجات مفتوحة التدرّج.

مقاس المنخل (ملم)	النسبة المئوية المارّة بالوزن		
	الفئة أ	الفئة ب	الفئة ج
٧٥ (٣ بوصة)			١٠٠
٥٠ (٢ بوصة)		١٠٠	١٠٠ – ٧٠
٣٧,٥ (١,٥ بوصة)		١٠٠ - ٧٥	٨٥ – ٥٠
٢٥ (١ بوصة)	١٠٠	-	-
١٩,٠ (٠,٧٥ بوصة)	١٠٠ – ٧٥	٦٥ - ٣٥	٥٥ – ١٥
٩,٥ (٨١٣ بوصة)	٦٥ – ٣٠	٣٥ - ٥	-
٦,٣ (٠,٢٥ بوصة)	-	-	٢٠ – ٠
٤,٧٥ (رقم ٤)	٣٠ – ٥	١٥- ٠	-
٢,٣٦ (رقم ٨)	١٠ – ٠	١٠ - ٠	١٠ – ٠
٠,٣٠٠ (رقم ٥٠)	٨ – ٠	٨ - ٠	٨ – ٠
٠,٠٧٥ (رقم ٢٠٠)	٥ – ٠	٥ - ٠	٥ – ٠

٣-٢-٢ الركام المستخدم مع طبقات ما تحت الأساس

٣-٢-٢-١ متطلبات الجودة

طبقة ما تحت الأساس هي ذلك الجزء من الهيكل الإنشائي للرصف المرن الذي يقع بين القاعدة الترابية وطبقة الأساس. ويجب أن تكون مادتها قادرة على تكوين طبقة ما تحت أساس متينة ومستقرة بعد تبليلها ودمكها (رصها). يجب أن يكون الركام من مواد صلبة

مقاومة للماء، من مصادر طبيعية أو صخور مكسّرة، ويجب أن تكون نظيفة خالية من أي شوائب أو مواد هشة مثل المواد العضوية، والكتل الطينية أو الأملاح القابلة للذوبان والمعادن، ولا يسمح باستخدام مواد يشتبه قابلة للتفكك عند تعرضها للبلل أو التجفيف.

ويجب أن يستوفي الركام متطلبات الجودة الواردة في الجدول (٣-٦).

الجدول (٣–٦) متطلبات الجودة لركام طبقة ما تحت الأساس.

متطلبات الجودة	طريقة الاختبار	القيمة
المتانة في كبريتات الصوديوم، خمس دورات، الحد الأقصى، ٪	AASHTO T104	٢٥
المحتوى المكسر، وجهان، ٪	ASTM D5821	٧٥ كحد أدنى [١]
التمدد، ٪ [٢]	ASTM D4792	٠,٥ كحد أقصى
مكافئ الرمل	AASHTO T176	٣٥ كحد أدنى
اختبار لوس أنجلوس للبري، الحد الأقصى، ٪	ASTM C131	٥٠
حد السيولة، الحد الأقصى، ٪	AASHTO T89	٢٥
مؤشر اللدونة، الحد الأقصى، ٪	AASHTO T90	٦
نسبة تحمل كاليفورنيا، ٪، الحد الأدنى	ASTM D1883	٥٠

ملحوظات:

١- يُعدّل هذا المتطلب عند توصيفه في وثائق العقد، مما ينص على استخدام طريقة أخرى لقياس الاحتكاك بين الجزيئات ثبت ارتباطها بالأداء الميداني الجيد.

٢- إجراء اختبارات الركام التي تحتوي على مكونات عرضة للترطيب، مثل خبث الحديد.

٣-٢-٢-٢ التدرج

يجب أن يحقق خلطة الركام أحد الدرجات الواردة في الجدول (٣-٧). يُختار التدرج بناءً على ما يتوفر من الركام. ويُستخدم التدرج المفتوح لصرف المياه أسفل الرصف.

الجدول (٣–٧) متطلبات التدرج لطبقات الأساس الحصوية.

مقاس المنخل (ملم)	النسبة المئوية المارّة بالوزن				
	(١)	(٢)	(٣)	(٤)	(٥) تدرج مفتوح
٧٥ (٣ بوصة)			١٠٠		١٠٠
٦٢,٥ (٢,٥ بوصة)	١٠٠			١٠٠	
٥٠ (٢ بوصة)	٩٧ – ١٠٠	١٠٠		٩٠ ١٠٠-	٧٠ – ١٠٠
٣٧,٥ (١,٥ بوصة)		٩٧ - ١٠٠	٧٠ - ١٠٠		٥٠ – ٨٥
٢٥ (١ بوصة)	٦٥ – ٧٩				-
١٩,٠ (٠,٧٥ بوصة)			٥٠ - ٨٥		١٥ – ٥٥
١٢,٥ (٠,٥ بوصة)	٤٥ – ٥٩				-
٩,٥ (٨\٣ بوصة)					

مقاس المنخل (ملم)	النسبة المئوية المارّة بالوزن				
	(١)	(٢)	(٣)	(٤)	(٥) تدرج مفتوح
٦,٣ (٠,٢٥ بوصة)					٠ – ٢٠
٤,٧٥ (رقم ٤)	٢٨ – ٤٢	٤٠ - ٦٠	٣٠ - ٦٠	٣٥-٧٠	-
٢,٣٦ (رقم ٨)					٠ – ١٠
٠,٤٢٥ (رقم ٤٠)	٩ – ١٧				
٠,٣٠٠ (رقم ٥٠)					٠,٨
٠,٠٧٥ (رقم ٢٠٠)	٤ – ٨	٠ - ١٢	٠ - ١٠	٠ - ١٥	٠,٥

٣-٢-٣ القوة:

كما هو الحال مع خلطات التربة، تشتمل طرق تحديد قوة المواد غير المترابطة (المتخلخلة) على اختبار نسبة تحمل كاليفورنيا (AASHTO T193) واختبار معامل المرونة (AASHTO T307).

٣-٣ الركام المُثبّت:

٣-٣-١ الأساس المعالج بالأسفلت:

يُشير الأساس المعالج بالأسفلت إلى المادة المخلوطة في الموقع، أو في مصنع مركزي، وتتكون من الركام والمستحلب الأسفلتي، التي يمكن استخدامها في تطبيقات الرصف المختلفة. ويجب أن تتوافق مع المتطلبات المنصوص عليها في الجزء (٤-٥) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق).

٣-٣-٢ طبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس المعالجة بالأسمنت:

تشير طبقة الأساس أو ما تحت الأساس المُثبّتة أو المعالجة بالأسمنت إلى المواد التي تُخلط في الموقع أو في مصنع مركزي، وتتكون من التربة/الركام والأسمنت والماء. ويجب أن تتوافق مع المتطلبات المنصوص عليها في الجزء (٤-٤) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق).

٣-٣-٣ طبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس المعالجة بالجير:

تعمل تقوية وزيادة صلابة طبقات الأساس وما تحت الأساس عن طريق التثبيت بالجير على تحسين القدرة على توزيع الأحمال على الهيكل الإنشائي للرصف، ومن ثم تحمي القاعدة الترابية الطبيعية ضد فرط الإجهاد بفعل التحميل المروري. يجب أن تتوافق طبقات الأساس وما تحت الأساس المعالجة بالجير مع متطلبات الجزء (٤-٧) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق).

٣-٣-٤ الأساس الخرساني المدموك بمدحلة (رصّاصة):

الخرسانة المدموكة بمدحلة هي نوع من الخرسانة الذي لا يهبط أبدًا (الهبوط يساوي صفرًا) في اختبار الهبوط (slump test)، ويستخدم المعدات التقليدية للرصف بالأسفلت والدمك. يمكن للخرسانة المدموكة بمدحلة تحقيق مستويات متانة انضغاط مكافئة لخلطات الخرسانة التقليدية أو تتخطاها. ولكن تصميم الخلطة لها يختلف عنها للخرسانة التقليدية الجيدة للرصف، ولا تحتوي على أي تسليح ولا فواصل ولا نقل للأحمال. وبسبب التصميم الخاص للخلطة وأساليب الإنشاء، لا يشيع استخدام الخرسانة المدموكة بمدحلة في إنشاءات الطرق، ولكن يمكن استخدامها كطبقة أساس صلبة في الرصف المركب.

٣-٣-٤-١ المواد :

٣-٣-٤-١-١ الركام :

تستخدم الخرسانة المدموكة بمدحلة ركامًا مشابها لما يُستخدم في الخرسانة العادية. وفي الواقع، لا يلزم استخدام ركام مُنظّف ومغسول في الخرسانة المدموكة بمدحلة؛ حيث يسهم وجود كمية قليلة من الحبيبات الدقيقة غير اللدنة (مرور ٢ - ٨٪ من المادة عبر منخل رقم ٢٠٠ (٠,٠٧٥ مم)) في تحسين خصائص الخرسانة المدموكة بمدحلة. ومع ذلك، سيكون مزج الركام مختلفًا عمّا يُستخدَم في الخرسانة العادية.

يتكون الركام الخشن من الحصى المُكسّر أو غير المُكسّر ومن الصخور المُكسّرة أو حتى من الخرسانة المُكسّرة المُعاد تدويرها، بينما يتكون الركام الناعم من الرمل الطبيعي أو الرمل المصنع، أو خلطة منهما معًا. يؤدي الركام المُكسّر وظيفة أفضل في خلطات الخرسانة المدموكة بمدحلة، بفضل ما تتمتع به الجزئيات من حواف متشابكة حادة تساعد على تقليص التباعد، وتوفر قوّة أعلى، وتحقق ترابط أفضل للركام عند الفواصل. نظرًا لتكون أكثر من ٩٠٪ من حجم خلطة الخرسانة المدموكة بمدحلة عالية الجودة من الركام الناعم والخشن، فينبغي تقييم متانتها من خلال الاختبار القياسي للخواص الطبيعية، مثل تلك الواردة في المواصفة (ASTM C33). يوصي كل من المعهد الأمريكي للخرسانة (ACI) واتحاد الأسمنت البورتلاندي (PCA) باستخدام خلطات كثيفة متناسقة التدرج بحيث لا يتجاوز الحد الأقصى الاسمي لحجم حبيبات الركام ٢٥ مم (١ بوصة) للمساعدة على تقليص التفكك والحصول على سطح نهائي أملس. فضلا عن ذلك، تقتضي التوصية بهذا التدرج استخدام محتوى من الجزئيات الدقيقة (مرور ٢ - ٨٪ عبر فتحات منخل رقم ٢٠٠ (٠,٠٧٥ مم)) وهو أعلى من المستخدم عادة في الخرسانة العادية (الجدول ٣-٨).

الجدول (٣–٨) التدرج في خلطات الخرسانة المدموكة بمدحلة.

مقاس المنخل (ملم)	النسبة المئوية المارّة بالوزن
٢٥ (١ بوصة)	١٠٠
١٩,٠ (٠,٧٥ بوصة)	٩٠ - ١٠٠
١٢,٥ (٠,٥ بوصة)	٧٠ - ٩٠
٩,٥ (٨\٣ بوصة)	٦٠ - ٨٥
٤,٧٥ (رقم ٤)	٤٠ - ٦٠
١,١٨ (رقم ١٦)	٢٠ - ٤٠
٠,١٥٠ (رقم ١٠٠)	٦ - ١٨
٠,٠٧٥ (رقم ٢٠٠)	٢ - ١٨

في الحالات التي يستخدم فيها الركام المغسول، يمكن أن يصعب تحقيق المواصفات بوجود ٢ - ٨٪ من الحبيبات الدقيقة. في الحالات المُشابهة، يمكن إضافة الرماد المتطاير إلى الخلطة؛ لتوفير المقدار المرغوب من المحتوي الناعم؛ حيث يوفر ذلك المحتوى الناعم وسيلة تشحيم تساعد على توزيع المعجون على الخلطة. ومع ذلك، يجب أن تكون تلك الذرات الناعمة غير لدنة، بحيث لا يتجاوز مؤشر لدونتها قيمة ٤. وفي العديد من الحالات، يستوفي الركام المستخدم عادة في إنشاءات الطرق متطلبات التدرج سالفة الذكر للخرسانة المدموكة بمدحلة. يمكن أيضًا استخدام مادة الأساس من الركام المتدرج ومواد مخلفات الكسارات وركام خلطات الأسفلت الساخن بتعديلات بسيطة أو بدون تعديلات في خلطات الخرسانة المدموكة بمدحلة.

٣-٣-٤-١-٢ الماء:

ينبغي أن يكون المحتوى المائي في الخلطة بالمقدار الذي يجعلها جافة بما يكفي؛ لدعم أحمال المدحلة (الرصاصة) الاهتزازية (خلطة هبوطها يساوي صفرًا)، ولكن مبتلة بما يكفي؛ لضمان التوزيع المتناسق لمعجون الأسمنت.

٣-٣-٤-١-٣ المواد الأسمنتية:

يندرج تحت مسمى المواد الأسمنتية كل من الأسمنت والبوزولان (pozzolan) المستخدم في خلطات الخرسانة المدموكة بمدحلة، وتحتوي على أسمنت بورتلاندي من النوع (I) أو النوع (IP) أو النوع (II) (ASTM C150)، أو الأسمنت الهيدروليكي

المخلوط (ASTM C595)، والفئة (F) أو الفئة (C) من الرماد المتطاير (ASTM C618)، ورغوة السيليكا (ASTM C1240)، وحبيبات الخبث الأرضي للأفران (ASTM C989). ينبغي أن يعتمد اختيار النوع والكمية المناسبين من المواد الأسمنتية على توفرها، بالإضافة إلى قوة التصميم والمتانة المطلوبة للخرسانة المدموكة بمدحلة النهائية. تتراوح عادة الكمية الإجمالية للمواد الأسمنتية التي تجمع بين الأسمنت والبوزولان – ويُشار إليها عادة بالاختصار (C+P) - في خلطة الخرسانة المدموكة بمدحلة بين ٢٤٠ - ٣٦٠ كجم لكل متر مكعب، في مدى واسع من نسب تلك المواد.

٣-٣-٤-١-٤ المضافات:

ينبغي أن تتوافق المضافات الكيميائية المستخدمة في خلطات الخرسانة المدموكة بمدحلة مع مواصفة (ASTM C494)، وينبغي اعتمادها قبل استخدامها.

٣-٣-٤-٢ تصميم الخلطة:

تشتمل الطرق الرئيسة لتحديد نسب مكونات خلطة الخرسانة المدموكة بمدحلة على تلك المُعتمدة على

١- اختبار تناسق الخرسانة.
٢- نموذج الجسيمات الصلبة المُعلقة.
٣- طريقة الحجم المثالي للمعجون.
٤- اختبار دمك التربة.

ويُعد تحديد نسب المكونات باستخدام اختبار دمك التربة هي الطريقة الأوسع انتشارًا عند تصميم الخلطة، ويوصى باتباعها. تنطوي طريقة تحديد نسب المكونات على تحديد العلاقة بين الكثافة ومحتوى الرطوبة في خلطة الخرسانة المدموكة بمدحلة، عن طريق دمك عينات على مدى من محتويات الرطوبة المتفاوتة. تُجرى اختبارات الرطوبة والكثافة، وتُرسم منحنيات العلاقة بين الرطوبة والكثافة لمدى مختلف من محتويات المادة الأسمنتية. ثم بعد ذلك تُحضَّر عينات لاختبار القوة، عن طريق دمك العينات عند محتوى الرطوبة الأمثل لكل محتوى مُحدد من المادة الأسمنتية. ومن تلك الاختبارات، يُرسم منحنى للمقارنة بين القوة بالنسبة إلى محتوى المادة الأسمنتية؛ لاختيار الحد الأدنى من المادة الأسمنتية الذي سيحقق متطلبات التصميم. ينقسم تحديد نسب المكونات باستخدام اختبارات دمك التربة إلى الخطوات التالية:

١- اختر الركام الذي سيُستخدَم. اختر كثافة وتدرج الركام المضاف إلى خلطة الخرسانة المدموكة بمدحلة، في ضوء القيم الموضحة في الجدول (٣-٨).
٢- اختر محتوى المادة الأسمنتية في متوسط المدى. ويُعبَّر عن المواد الأسمنتية كنسبة من إجمالي المواد الجافة، ويُحسَب بالمعادلة التالية:

المعادلة (٣-١)

$$\textbf{Cementitious materials } (\%) = \frac{\textbf{Weight of cementitious materials}}{\textbf{(Weight of cementitious materials + oven-dried aggregates)}} \times \mathbf{100}$$

٣- طور رسومات الرطوبة-الكثافة. وتُختار محتويات مختلفة من الرطوبة لنسبة ثابتة من المواد الأسمنتية؛ لرسم منحنى الرطوبة-الكثافة. يتراوح محتوى الرطوبة الأمثل، لغالبية مواد الركام، بين ٥ - ٨ بالمائة. ويُحسب محتوى الرطوبة: بالمعادلة التالية:

المعادلة (٣-٢)

$$\textbf{Moisture content } (\%) = \frac{\textbf{Weight of water}}{\textbf{(Weight of cementitious materials + oven-dried aggregates)}} \times \mathbf{100}$$

ويمكن استخدام طريقة اختبار بروكتور المعدّل (ASTM D1557)، لكل محتوى أسمنتي لتحديد أقصى كثافة جافة ومحتوى الرطوبة الأمثل. عند استخدام أنواع ركام أضعف، ينبغي استخدام اختبار بروكتور القياسي (ASTM D698)؛ لمنع تشقق الركام خلال الاختبار. ومن المقترح إعداد ثلاث رسومات على الأقل لثلاث قيم مختلفة من المحتوى الأسمنتي.

٤- صب العينات في قوالب لقياس قوة الانضغاط. تُعدّ عينات اختبار قوة الانضغاط لكل محتوى من المادة الأسمنتية، باستخدام المطرقة الاهتزازية (ASTM C1435) أو طريقة الطاولة الاهتزازية (ASTM C1176). وينبغي قولبة جميع العينات عند محتوى الرطوبة الأمثل الخاص بالمحتوى الأسمنتي للخلطة.

٥- أجر الاختبار على العينات واختر المحتوى المطلوب. تُختبر العينات لتحديد قوة ضغطها، عند المحتويات الأسمنتية المُختارة. يُرسَم مخطط للبيانات ويُطور منحنى العلاقة بين قوة الانضغاط والمحتوى الأسمنتي. وباستخدام هذا المُنحنى، يمكن اختيار المحتوى الأسمنتي الذي يحقق القوة المطلوبة.

٦- احسب نسب مكونات الخلطة. إذا كان المحتوى الأسمنتي المطلوب مختلف على نحو كبير عن جميع المحتويات الأسمنتية المستخدمة في الاختبارات، فيمكن أن يلزم إجراء اختبار جديد؛ لتحديد العلاقة بين الرطوبة والكثافة؛ وذلك لتحديد محتوى الرطوبة الأمثل عند المحتوى الأسمنتي المطلوب. ومن المنطقي أيضًا تقدير قيمة محتوى الرطوبة الأمثل عن طريق الاستيفاء (interpolation)، إذا لم تختلف نسبة محتوى الرطوبة الأمثل بصورة كبيرة على امتداد مدى القيم المختلفة من المحتوى الأسمنتي المستخدمة خلال الاختبار.

٣-٣-٥ الأساس المسامي المعالج بالأسفلت:

الأساس المسامي المعالج بالأسفلت هي مادة تتكون من ركام مفتوح التدرج، ويُثبَّت باستخدام الخرسانة الأسفلتية. هذه الطبقة عادة ما تكون بسماكة ١٠٠-١٥٠ مم، وتوضع فوق طبقة ما تحت الأساس أو طبقة الأساس المكونة من الركام الحبيبي غير المترابط. ويمكن استخدامها تحت أنواع الرصفيات المرنة أو الصلبة، حيث يحتمل أن يتسبب فرط التعرض للمياه في ارتفاع منسوب المياه الجوفية، ويشمل نظام صرف سفلي لتجميع مياه الصرف. تتكون قاعدة الأساس المسامي المعالج بالأسفلت من ركام معدني متين عالي الجودة، وبه مقدار صغير لا يُذكر من الذرات الدقيقة. ينبغي أن يتكون الركام المستخدم في قاعدة الأساس المسامي المُعالج بالأسفلت من جزيئات نظيفة وقوية وصلبة ومتينة ومضلعة الشكل من الأحجار المكسرة. ومن الضروري أيضًا أن يخلو الركام من كرات الطمي والمواد العضوية، وغيرها من المواد الضارة. وتُمزَج مكونات الركام مع كمية مناسبة من مادة بيتومينية لتكسية الجزئيات بانتظام. ويوصى بأن تتراوح نسبة محتوى الأسفلت في قاعدة الأساس المسامي المعالج بالأسمنت بين ٢,٠ إلى ٣,٥ بالمائة بالوزن من الخلطة الكلية، لضمان الطلاء المتناسق للجزيئات (فيما يتعلق بالمتانة طويلة المدى) والقوة المناسبة.

يسمح تصميم طبقة الأساس المسامي المعالج بالأسمنت بنفاذية الماء عبرها إلى الصرف. وفي هذه الظروف، تكون تعرية الأسفلت من المخاوف المقلقة؛ لذا وبهدف تحسين متانة طبقة الأساس المسامي المُعالج بالأسمنت، يُنصح بإضافة عامل مضاد للتعرية في صورة جير مطفأ، وخصوصًا إذا لم يكن الركام الخشن من الحجر الجيري أو من الدولوميت. ينبغي إضافة الجير بجرعة بنسبة تتراوح بين ٠,٥ إلى ١,٠ بالمائة من الوزن.

٣-٤ الركام المُعاد تدويره:

تشتمل أشهر استخدامات الركام المُعاد تدويره، بما في ذلك مواد الخرسانة المُستصلحة (RCM) ورصف الأسفلت المستصلح (RAP). ويُشار أحيانًا إلى مواد الخرسانة المستصلحة بخرسانة الرصف مُعادة التدوير، أو الخرسانة المكسرة. وتتكون من ركام عالي الجودة وجيد التدرج (يكون عادة من الركام المعدني)، ومترابطة بمعجون أسمنتي مقوى. وأحيانًا تُنتَج مواد الخرسانة المستصلحة من تهديم أجزاء خرسانة الأسمنت البورتلاندي من الطرق ومدارج المطارات والمنشئات خلال أعمال إعادة إنشاء الطرق، وحفريات المنافع أو أعمال الهدم. ويُطلق مصطلح رصف الأسفلت المستصلح على مواد الرصف المُزالة و/أو المعاد معالجتها والتي تحتوي على الأسفلت والركام. تنتج تلك المواد عند إزالة الرصفيات الأسفلتية من أجل إعادة إنشائها، أو إعادة إنشاء طبقتها السطحية، أو عند الحاجة إلى الوصول إلى المنافع المطمورة. عند تكسير وفرز مواد رصف الأسفلت المستصلح بطريقة صحيحة، فإنه يتكون من ركام عالي الجودة ومتناسق التدرج ومغطى بالأسمنت الأسفلتي.

٣-٤-١ طبقات الأساس وما تحت الأساس غير المُثبّتة:

يمكن المزج بين الركام مُعاد التدوير والركام حديث الإنتاج، شريطة توافق التدرج والجودة المادية مع متطلبات الجزئين الفرعيين (٣-٢-١) و (٣-٢-٢)، ومطابقة متطلبات الجزء (٤-٨) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق).

٣-٤-٢ طبقات الأساس وما تحت الأساس المُثبّتة:

ينبغي استيفاء المتطلبات المذكورة في الجزء (٣-٣).

٣-٤-٣ مواد الخرسانة الأسفلتية:

يمكن مزج خرسانة الرصف الأسفلتية المطحونة أو المسحوقة (رصف الأسفلت المستصلح، RAP) مع عنصر إعادة تدوير الأسفلت، والماء، وإضافات أخرى؛ للحصول على خلطة أسفلتية باردة معادة التدوير. يعمل الرصف الناتج كطبقة أساس تُغطَى بمعالجة سطحية أو طبقة سطحية من الأسفلت. ويجب أن تتوافق متطلبات المواد مع متطلبات كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق).

٣-٥ مواد الأسفلت:

يتناول هذا الجزء خصائص المادة الرابطة للأسفلت لتصميم خلطة طبقات الخرسانة الأسفلتية. ويعرض كود الطرق ٤٠١ (إنشاء الطرق) مواد الأسفلت الأخرى المستخدمة في إنشاء الرصف.

٣-٥-١ درجات الاختراق واللزوجة:

يجب أن تُصنّف درجة مواد أسفلت الرصف بناءً على اللزوجة (ASTM D3381) أو الاختراق (ASTM D946) للأسفلت الأصلي. ونظرًا لارتفاع درجات الحرارة في المملكة؛ فإنه يجب أن تكون درجة الاختراق للمادة الرابطة للأسفلت (٤٠\٥٠) أو (٦٠\٧٠) المحسن للوصول إلى القيمة المطلوبة، وهي (٤٠\٥٠). أما درجة اللزوجة للمادة الرابطة للأسفلت فيجب أن تكون (AC-40). ومن الضروري أن يتوافق الأسفلت مع متطلبات الجدول (٣-٩) والجدول (٣-١٠) لدرجة الاختراق ودرجة اللزوجة، على الترتيب.

الجدول (٣–٩) مواصفات الأسفلت المصنف للاختراق.

الخاصية	الاختبار	درجة الاختراق			
		٤٠ - ٥٠		٦٠ – ٧٠	
		الأدنى	الأقصى	الأدنى	الأقصى
الاختراق، ٢٥ درجة مئوية، ١٠٠ جم، ٥ ثوانٍ	ASTM D5	٤٠	٥٠	٦٠	٧٠
معدل الاختراق، ٪ كحد أدنى[١]	-	٢٥	٢٥	٢٥	٢٥
اللزوجة عند ٦٠ درجة مئوية، بواز (Poise)، كحد أدنى	ASTM D2171	٦٠٠٠	-	٢٦٠٠	-
اللزوجة عند ١٣٥ درجة مئوية، حركية (Kinematic)، كحد أدنى	ASTM D2170	٢٤٠	-	٢٠٠	-
نقطة الوميض، كليفلاند المفتوحة، درجة مئوية، كحد أدنى	AASHTO T48	٢٣٢	-	٢٣٢	-
الليونة عند ٢٥ درجة مئوية، ٠ مم لكل دقيقة، سم، كحد أدنى	ASTM D113	١٠٠	-	١٠٠	-
قابلية الذوبان في ثلاثي كلورو الإيثيلين، نسبة، كحد أدنى	AASHTO T44	٩٩	-	٩٩	-
اختبار فرن الطبقات الرقيقة، ٣,٢ مم، ١٦٣ درجة مئوية، ٥ ساعات:					
نسبة الفاقد في قوة التحمل إلى الأصل، كحد أقصى	-	-	٠,٨	-	٠,٨
اختراق الرواسب، نسبة من الأصل	ASTM D5	٥٨	-	٥٤	-
ليونة الرواسب عند ٢٥ درجة مئوية، ٥٠ مم لكل دقيقة، سم، كحد أدنى	ASTM D113	-	-	٥٠	-
قابلية الذوبان في ثلاثي كلورو الإيثيلين، ٪، كحد أدنى	AASHTO T44	٩٩	-	٩٩	-
اختبار "سبوت" (Spot test)، في الوقت المحدد وبالصورة المحددة[٢]**، مع:**					
مُذيب نفثا قياسي	AASHTO T102	سلبي لجميع الدرجات			
مُذيب نفثا-زيلين		سلبي لجميع الدرجات			
مذيب هيبتان- زيلين		سلبي لجميع الدرجات			
ملحوظة:					

الخاصية	الاختبار	درجة الاختراق			
		٤٠ - ٥٠		٦٠ – ٧٠	
		الأدنى	الأقصى	الأدنى	الأقصى
١- نسبة الاختراق = (الاختراق عند ٤ درجات مئوية، ٢٠٠ جرام، و٦٠ ثانية) × (١٠٠) \ (الاختراق عند ٢٥ درجة مئوية، ١٠٠ جرام و٥ ثواني).					
٢- استخدام اختبار "سبوت" اختياري. عند توصيفها، يجب على المهندس تحديد ما إذا كان سيُستخدم مذيب النفثا القياسي، أو مذيب النفثا- زيلين، أو مذيب هبتان- زيلين في تحديد الامتثال للمتطلبات، وكذلك، في حالة مذيبات الزيلين، النسبة المئوية للزيلين الذي سيُستخدم.					

الجدول (٣–١٠) مواصفات الأسفلت المصنف باللزوجة.

الاختبار	درجة اللزوجة	
	الاختبار	AC-40
اللزوجة عند ٦٠ درجة مئوية، بواز (Poise)	ASTM D2171	٤٠٠٠ ± ٨٠٠
اللزوجة عند ١٣٥ درجة مئوية، CS كحد أدنى	ASTM D2170	٤٠٠
الاختراق، ٢٥ درجة مئوية، ١٠٠ جرام، ٥ ثوانٍ، كحد أدنى	ASTM D5	٤٠
نقطة الوميض، COC، درجة مئوية (فهرنهايت)، كحد أدنى	AASHTO T48	٢٣٢ (٤٥٠)
قابلية الذوبان في ثلاثي كلورو الإيثيلين، نسبة، كحد أدنى	AASHTO T44	٩٩
الاختبارات على رواسب اختبار فرن الطبقات الرقيقة:		
فقدان التسخين، نسبة، كحد أقصى (اختياري)	AASHTO T240	٠,٥
اللزوجة عند ٦٠ درجة مئوية، بواز، كحد أقصى	ASTM D2171	١٦٠٠٠
الليونة، ٢٥ درجة مئوية ٥ سم في الدقيقة سم، كحد أدنى	ASTM D113	٢٥
اختبار "سبوت" (Spot test) (في الوقت المحدد وبالصورة المحددة)، مع		
مُذيب نفثا قياسي	سلبي لجميع الدرجات	
مذيب نافتا- زيلين، ٪ زيلين	سلبي لجميع الدرجات	
مذيب هيبتان- زيلين، ٪ زيلين	سلبية	
استخدام اختبار "سبوت" اختياري. عند توصيفها، يجب على المهندس تحديد ما إذا كان سيُستخدم مذيب النفثا القياسي، أو مذيب النفثا- زيلين، أو مذيب هبتان- زيلين في تحديد الامتثال للمتطلبات، وكذلك، في حالة مذيبات الزيلين، النسبة المئوية للزيلين الذي سيُستخدم.		

٣-٥-٢ درجة الأداء (PG):

ينبغي تحديد درجة الأداء على مفهوم ضرورة توافق خواص المادة الرابطة للأسفلت مع ظروف استخدامها. حيث تُختار درجة أداء المادة الرابطة للأسفلت بما يضمن توافقها مع الظروف المناخية المتوقعة، بالإضافة إلى سرعة المرور وحجمه (AASHTO M320). يُشار إلى درجة الأداء للمادة الرابطة (PG XXZ-YY) من خلال درجة الأداء باستخدام اختبار استرداد زحف الإجهاد المتعدد (MSCR) (AASHTO M332, T350). وتشير القيمة (XX) إلى متوسط ٧ أيام لدرجات حرارة تصميم الرصف القصوى بينما تشير القيمة (YY) إلى الحد الأدنى لدرجة حرارة تصميم الرصف ليوم واحد في السنة خلال ٢٠ عامًا متوالية. تعتمد القيمة (Z) على تحميل المرور وسرعته، وتشير إلى مسمى فئة المادة الرابطة (الجدول ٣-١١). يُلبي الأسفلت المبني على درجة الأداء متطلبات الجودة الواردة في الجدول (٣-١٢).

الجدول (٣–١١) تحديد قيمة الكود (Z) – مسميات مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) والمرور.

مسمى فئة المادة الرابطة	مسمى فئة الخلطة	مدى مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs)، بالملايين
S (قياسي)	VL (خفيف جدًا)	أقل من ٠,٣ (والسرعة أكبر من ٧٠ كم/ساعة)
	L (خفيف)	٠,٣ - ٣ (والسرعة أكبر من ٧٠ كم/ساعة)
	M (متوسط)	٣ - ١٠ (والسرعة أكبر من ٧٠ كم/ساعة)
H (ثقيل)	H (ثقيل)	١٠ - ٣٠ (أو سرعة بين ٢٠-٧٠ كم/ساعة)
V (ثقيل جدا)	V (ثقيل جدا)	أكبر من ٣٠ (أو سرعة أكبر من ٢٠ كم/ساعة)
E (ثقيل للغاية)	E (ثقيل للغاية)	أكبر من ٣٠ (وسرعة أقل من ٢٠ كم/ساعة)

الجدول (٣–١٢) متطلبات الجودة لدرجات أداء مادة رابطة للأسفلت.

الاختبار		الوصف	المواصفة	المتطلبات
الأسفلت الجديد				
نقطة الوميض		AASHTO T48		٢٣٠ درجة مئوية (كحد أدنى)
اللزوجة النسبية		عند ١٣٥ درجة مئوية	AASHTO T316	٣ باسكال.ثانية (كحد أقصى)
القص الديناميكي (G*/sinδ at 10 rad/sec)		عند درجة حرارة أعلى	AASHTO T315	١ كيلو باسكال (كحد أدنى)
عينات رواسب الأسفلت من اختبار فرن الطبقة الرقيقة الدوار (RTFO)				
٪ الفاقد (RTFO)		عند ١٦٣ درجة مئوية	AASHTO T240	١٪ (كحد أقصى)
القص الديناميكي (G*/sin δ)		عند درجة الحرارة الأعلى	AASHTO T315	٢,٢ كيلو باسكال (كحد أدنى)
عينات رواسب الأسفلت من اختبار فرن الطبقة الرقيقة الدوار (RTFO) واختبار وعاء الضغط المُعمّر (PAV)				
القص الديناميكي (G*/sin δ)		عند درجة الحرارة الوسيطة	AASHTO T315	٥٠٠٠ كيلو باسكال (كحد أقصى)
مقياس انحناء العارضة bending)	الصلابة ضد الزحف	عند الحد الأدنى لدرجة الحرارة + ١٠ درجات مئوية لمدة ٦٠ ثانية	AASHTO T313	٣٠٠ ميجا باسكال (كحد أقصى)

beam (rheometer	قيمة (m)	عند الحد الأدنى لدرجة الحرارة + ١٠ درجات مئوية لمدة ٦٠ ثانية	AASHTO T313	٠,٣ (كحد أدنى)
الشد المباشر		عند أدنى درجة حرارة	AASHTO T314	١ ٪ (كحد أدنى)

تُحدد درجة أداء أو نوع المادة الرابطة للأسفلت المناسب لموقع المشروع باتباع الخطوات التالية:

١- تحديد الحد الأدنى لدرجة حرارة الرصف باستخدام الحد الأدنى لدرجة حرارة الهواء على امتداد فترة المراقبة، أو بتطبيق المعادلة التالية:

$$Low\ T_{pav} = -1,56 + 0,72 \times T_{air} - 0,004 \times Lat^2 + 6,26 \times log_{10}(H + 25) - Z \times (4,4 + 0,52 \times \sigma_{air}^2)^{0,5}$$

المعادلة (٣-٣)

حيث:

T_{pav} = الحد الأدنى لدرجة الحرارة التصميمية، ودرجة الحرارة المئوية عند عمق H (مم) من سطح الرصف (الحد الأدنى المتوقع لدرجة حرارة الرصف خلال فترة التصميم).

T_{air} = الحد الأدنى لدرجة الحرارة اليومية بالدرجة المئوية.

Lat = الموقع الجغرافي للمشروع (دائرة العرض) بالدرجات.

Z = معامل الثقة = ٢,٠٥٥ عند مستوى ثقة ٩٨٪

H = العمق إلى السطح (مم)

σ_{air} = الانحراف المعياري للحد الأدنى لدرجة الحرارة اليومية.

٢- تحديد الحد الأقصى لدرجة حرارة الرصف، باعتبارها درجة الحرارة عند عمق عشرين (٢٠) ملليمتر من سطح الرصف، والتي تُحدد باستخدام المعادلات الحسابية المعتمدة واستخدام متوسط درجة حرارة الهواء خلال السبعة أيام الأكثر حرارة خلال فترة المراقبة، والموقع الجغرافي للمشروع (دائرة العرض)، عن طريق المعادلة التالية:

$$High\ T_{pav} = 54,32 + 0,78 \times T_{air} - 0,0025Lat^2 - 15,14 \times log_{10}(H + 25) + Z \times (9 + 0,61 \times \sigma_{air}^2)^{0,5}$$

المعادلة (٣-٤)

حيث:

T_{pav} = الحد الأقصى لدرجة الحرارة التصميمية للرصف عند عمق H (مم) من سطح الرصف، درجة مئوية.

T_{air} = متوسط درجة حرارة الهواء خلال السبعة أيام الأكثر حرارة, C°.

Lat = الموقع الجغرافي للمشروع (دائرة العرض) بالدرجات.

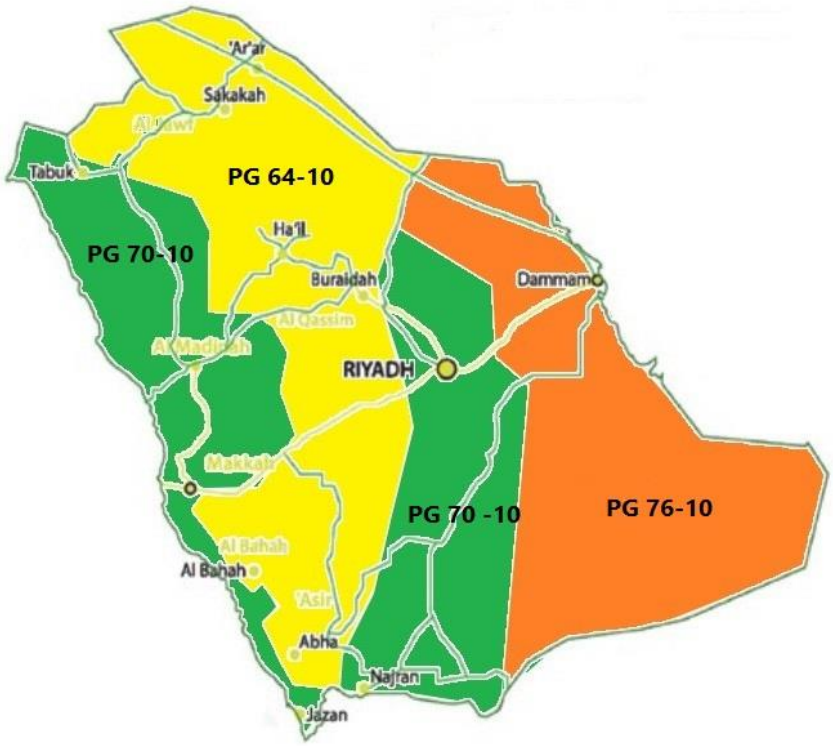
Z = معامل الثقة = ٢,٠٥٥ عند مستوى ثقة ٩٨٪

H = العمق إلى السطح (مم)

σ_{air} = الانحراف المعياري للحد الأقصى لدرجة حرارة الهواء خلال ٧ أيام.

٣- يجب ألا يقل مستوى الموثوقية المستخدم لتحديد الحد الأقصى أو الأدنى لدرجة الحرارة، عن ثمانية وتسعين بالمائة (٩٨٪). ويدل هذا ضمنيًا إلى زيادة متوسط درجات الحرارة القصوى وخفض متوسط درجات الحرارة الدنيا بقيمة تعادل ضعف قيمة الانحراف المعياري لمتوسط درجات الحرارة على مدى فترة عشرين عامًا.

ويجب اختيار درجة أداء المادة الرابطة الأسفلتية على أساس درجات الحرارة في موقع المشروع، في أي منطقة في المملكة، وذلك باستخدام المعادلتين (٣-١) و (٣-٢). في حال عدم توفر معلومات حول المشروع، فيجب استخدام درجات الأداء الموضحة في الشكل (٣-٤).



الشكل (٣–٤) مناطق الحرارة في المملكة العربية السعودية.

٣-٥-٣ المُحسِّنات:

عندما لا تفي المادة الرابطة للأسفلت المتاحة بمتطلبات الأداء، يجب تحسين الأسفلت باستخدام مُحسِّنات. ينبغي على المقاول توثيق التحسين المقترح ونسبته وطريقة الإضافة ونتائج الاختبار. وينبغي أن تستوفي نتائج الاختبارات متطلبات الجودة الواردة في الجدول (٣-٢).

تُعد البوليمرات أشهر المُحسِّنات المستخدمة. تتكون المادة الرابطة المُحسَّنة بالبوليمرات من الأسفلت المخلوط مع بوليمر صناعي أو مع المطاط المفتت. تُستخدم المواد الرابطة المُحسَّنة بالبوليمرات لتحسين أداء المواد الرابطة المستخدمة على أسطح الرصف المعرّضة لأحجام مرورية كبيرة أو إجهاد مرتفع، وتكون في ظروف مناخية قاسية عادة. تشتمل تحسينات الخواص على تخفيض قابلية التأثر بدرجات الحرارة، وزيادة مستوى اللدونة أو المرونة، وزيادة الترابط وتحسين التماسك بمجرد تحقق الترابط. ويؤدي هذا إلى تحسين الأداء، بما في ذلك انخفاض خطر نزف (طفح) الأسفلت، وتحسين مقاومة التشققات، واحتفاظ أفضل بالركام، وتقليص التشوهات التي تحدث مع درجات الحرارة المرتفعة. تضم مجموعات البوليمرات ما يلي:

- بوليمرات لدائنية مرنة (Elastomeric) تتضمن ستيرين- بيوتادايين-ستيرين (SBS)، مطاط ستيرين- بيوتادايين (SBR)، وبولي بيوتادايين (PBD). تكون المواد الرابطة المُحسَّنة ببوليمر لدائني مرن بمرونة محسنة، وتكون أقل حساسية للحرارة.
- البوليمرات اللدائنية (Plastomeric) بما في ذلك أسيتات إيثيلين فينيل (EVA)، إيثيلين ميثاكريلات (EMA)، بولي بروبيلين غير المتسق (APP)، وبولي بروبيلين (PE). وتزيد المواد الرابطة المُحسَّنة بالبوليمر اللدائني من الصلابة.
- يُحصل على فتات المطاط عادة من تمزيق وطحن المخلفات المطاطية لإطارات السيارات. عند مزج المطاط مع الأسفلت يعمل كنوع من اللدائن المرنة.

وتستوفي المادة الرابطة للأسفلت المُحسَّنة المواصفات القائمة على الأداء الواردة في الجزء الفرعي (٣-٥-٢).

٣-٥-٤ اختيار المادة الرابطة:

يجب اختيار درجة أداء المادة الرابطة للأسفلت على أساس درجات الحرارة في موقع المشروع، في أي منطقة في المملكة، وذلك باستخدام المعادلات والطرق الواردة تفصيلا في الجزء الفرعي (٣-٥-٢).

يجب اختيار درجتي الاختراق واللزوجة للأسفلت وفقًا لما نص عليه الجزء الفرعي (٣-٥-١). ويلاحظ أن درجتي الاختراق واللزوجة تفتقران إلى القيام باختبارات عند درجات الحرارة المُختلفة، وهو ما يتناسب مع الظروف التشغيلية للمشروع، بغية الحصول على القيمة المستهدفة في المواصفات. لذا، لا توجد توصية محددة لاستخدام درجات مختلفة تبعًا لمناطق درجات الحرارة في المملكة.

يوصى بشدة باستخدام الأسفلت المُحسَّن في حالة الطرق ذات الأحجام المرورية الكبيرة والطرق السريعة والطرق شبه السريعة والطرق الصناعية.

٣-٦ مواد الخرسانة الأسفلتية:

ينطوي تصميم الخلطة على طرق معملية مُعدّة لتحديد النسب اللازمة من المواد لاستخدامها في خلطة الأسفلت. وتشتمل تلك الطرق على حساب نسب خلطة مصادر الركام للحصول على التدرج المناسب من الركام المعدني، واختيار نوع وكمية الأسمنت الأسفلتي المستخدم كمادة رابطة لذلك التدرج. ويتوقع لخلطات الأسفلت مُتقنة التصميم أن تستمر في الخدمة لسنوات طويلة تحت تأثير الأحمال والظروف البيئية المُختلفة. تُقترح طريقتان: طريقة مارشال لتصميم الخلطة وسوبربيف. من حيث المبدأ، يمكن استخدام كلتا الطريقتين. ومع ذلك، نظرًا لأن طريقة سوبربيف تتفوق على طريقة مارشال، يُقترح تنفيذ طريقة مارشال للطرق المحلية والتجميعية منخفضة الحجم المروري، بينما يُقترح تطبيق طريقة سوبربيف للطرق ذات الحجم المروري الكبير والطرق السريعة.

٣-٦-١ طريقة مارشال لتصميم الخلطة:

قررت (AASHT0) و (ASTM) اتباع طريقة مارشال للاختبار باعتبارها مواصفة قياسية. وقد حددت المواصفات (ASTM D6926) و (ASTM D6927) و (AASHTO T245) تفاصيل تلك الطريقة. تنطوي طريقة مارشال لتصميم الخلطة على الخطوات التالية:

- اختيار المواد.
- تحديد التدرج الحبيبي للركام المركب.
- درجات حرارة الخلط والدمك بالمعمل.
- إعداد ودمك عينات الاختبار.
- تحديد الخصائص الحجمية.
- اختبار الاستقرار والتدفق.
- تحديد النسبة التصميمية لمحتوى المادة الرابطة للأسفلت.

٣-٦-١-١ اختيار المواد:

يمكن تصنيف المادة الرابطة للأسفلت تبعًا لدرجة الاختراق، أو درجة اللزوجة، أو درجة الأداء. ويجب أن يتوافق الأسفلت مع متطلبات كل من الجدول (٣-٩) والجدول (٣-١٠) والجدول (٣-١١)، على الترتيب.

الركام الخشن هو الأحجار الصلبة التي يتجاوز مقاسها ٤,٧٥ مم (لا تعبر من المنخل رقم ٤). ويجب أن تكون من الصخور المكسرة أو الخبث المكسر أو الحصى المكسر. ومن الضروري أن يتوافق الركام الخشن مع أحد التدرجات المحددة في مواصفة (AASHTO M43)، والذي يتطابق مع الحد الاقصى للمقاس الاسمي لركام خلطات الأسفلت. أما الركام الناعم فهو المواد التي تعبر من المنخل رقم ٤ (٤,٧٥ مم)، ويجب أن تكون ناتجة عن الصخور المكسرة أو الخبث المكسر أو الحصى المكسر، أو من الرمل المُصنّع. يجب أن يتوافق الركام الناعم مع أحد مواصفات التدرج الواردة في المواصفة (AASHTO M29). المادة المالئة المعدنية هي جزء من الركام الناعم يقل حجمه عن ٦٠٠ ميكرومتر (تعبر من المنخل رقم ٣٠). عندما تكون المادة المالئة المعدنية المستخدمة غير مناسبة، يجدر استخدام مسحوق الحجر المكسر، أو الغبار، أو مسحوق خبث الحديد أو غباره، أو الأسمنت البورتلاندي، أو الجير، أو أي مسحوق معدني أخر كمادة مالئة معدنية شريطة أن تتوافق مع متطلبات الجودة. يجب أن يتوافق المادة المالئة المعدنية مع مواصفة (AASHTO M17). يجب ألا يتجاوز حد اللدونة ٤٪، باستثناء حالتي الجير والأسمنت. ويجب أن توفر المادة المالئة المعدنية، عند اختبارها منفردة، تدرجًا منتظمًا يتوافق مع المواصفة (AASHTO M17). يجب اختيار الركام الخشن المقاوم للصقل (على سبيل المثال، ركام خبث الحديد) لضمان مقاومة الانزلاق الكافية لخلطة سطح الأسفلت. وما لم ينص على خلاف ذلك في المواصفات الخاصة

أو حسب تعليمات المهندس، يجب أن يكون للركام الخشن قيمة حجر مصقول تبلغ ٥٠ أو أكثر عند اختباره باستخدام جهاز اختبار البندول البريطاني (British Pendulum Tester) وفقًا للمواصفتين (ASTM D3319) و (ASTM E303).

٣-٦-١-٢ تحديد التدرج الحبيبي للركام المركب:

يجب أن يتوافق الركام المركب مع متطلبات الجودة لكل نوع مستقل من الركام. هناك خصائص معينة للركام ضرورية للحصول على خلطة أسفلتية ساخنة (HMA) جيدة الأداء، وقد أقر ذلك نخبة كبيرة من خبراء الصناعة. وتُعرف تلك الخصائص باسم "خواص الإجماع" وهي كالتالي: الشكل الزاويّ للركام الخشن (CAA)، والشكل الزاويّ للركام الناعم (FAA) والجزيئات المستطيلة والرقيقة (F&E)، والمكافئ الرملي (SE). ويعرض الجدول (٣-١٣) تفاصيل خواص الإجماع.

الجدول (٣–١٣) متطلبات خصائص الإجماع للركام (Asphalt Institute, 2014).

مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs)[١] التصميمي لمدة ٢٠ سنة (بالمليون)	الشكل الزاويّ للركام الخشن (٪)[٣] كحد أدنى AASHTO T335 (CAA)		محتوى الفراغ غير المدموك الشكل الزاويّ للركام الناعم (٪)، كحد أدنى AASHTO T304 (FAA)		المكافئ الرملي (٪)، كحد أدنى AASHTO T176 (SE)	الجزيئات المستطيلة والرقيقة[٣]، كحد أقصى ASTM D4791 (F&E)
	أقل من أو يساوي ١٠٠ مم[٦]	أكبر من ١٠٠ مم[٦]	أقل من أو يساوي ١٠٠ مم	أكبر من ١٠٠ مم[٦]		
أقل من ٠,٣	-/٥٥	-/-	[٤]	-	٤٠	-
٠,٣ - ٣	-/٧٥	+ ٥٠	٤٠[٥]	٤٠	٤٠	١٠
٣ - ١٠	٨٥ / ٨٠[٢]	+ ٦٠	٤٥	٤٠	٤٥	١٠
١٠ - ٣٠	٩٥ / ٩٠	٨٠ / ٧٥	٤٥	٤٠	٤٥	١٠
أكبر من أو يساوي ٣٠	١٠٠ / ١٠٠	١٠٠ / ١٠٠	٤٥	٤٥	٥٠	١٠

ملحوظة:

١- مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) التصميمي عند مستوى المرور المتوقع للمشروع على المسار التصميمي على مدار ٢٠ عامًا.

٢- ٨٠/٨٥ تعني أن ٨٥٪ من الركام الخشن يحتوي على وجه مكسّر واحد أو أكثر، بينما يحتوي ٨٠٪ منه على وجهين أو أكثر من الأوجه المكسّرة.

٣- لا يسري هذا المعيار على الخلطات التي يكون الحد الأقصى للمقاس الاسمي للركام هو ٤,٧٥ مم.

٤- بالنسبة للخلطات التي يكون الحد الأقصى للمقاس الاسمي للركام هو ٤,٧٥ مم، والمصممة لمستويات مرورية تقل عن ٠,٣ مليون من مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) التصميمي، يكون الحد الأدنى لمحتوى الفراغ غير المدموك هو ٤٠.

٥- بالنسبة للخلطات التي يكون الحد الأقصى للمقاس الاسمي للركام هو ٤,٧٥ مم، والمصممة لمستويات مرورية لا تقل عن ٠,٣ مليون من مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) التصميمي، يكون الحد الأدنى لمحتوى الفراغ غير المدموك هو ٤٥.

٦- إذا كان ٢٥٪ من سمك طبقة فرد الخلطة الأسفلتية يقع على بعد ١٠٠ مم من السطح، فيمكن النظر في تحديد سماكة الخلطة بأقل من ١٠٠ مم، لأغراض تصميمية.

إلى جانب (خواص الإجماع) للركام، هناك بعض الخصائص الأخرى الحرجة أيضًا. لكن، لم يمكن الوصول لإجماع بشأنها، لأن القيم المنشودة مرتبطة بمصدر محدد. وبالتالي، يُنصح بمجموعة من خواص المصدر. تُوصّف اختبارات خواص المصدر عادة لوضع حدود على خواص الركام، مثل الصلابة (toughness) والمتانة (soundness) والمواد الضارة. يعرض الجدول (٣-١٤) بعض اختبارات خواص المصدر الموصى بها، ومتطلباتها التقليدية.

الجدول (٣–١٤) اختبارات خواص المصدر الموصى بها ومتطلباتها النموذجية (Asphalt Institute, 2014).

مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد التصميمي (ESALs) لمدة ٢٠ سنة (بالمليون)	اختبار لوس أنجلوس للبري (الحد الأقصى ٪) (ASTM C131)	متانة كبريتات الصوديوم أو المغنيسيوم (الحد الأقصى، ٪) AASHTO) (T104	المواد الضارة *	
			الكتل الطينية / الجزيئات القابلة للتفتت (AASHTO T112)	الجزيئات خفيفة الوزن (AASHTO T112)
أقل من ٠,٣	٤٥	٢٥	أقل من ٥	أقل من ٥
٠,٣ – ٣	٤٠	٢٠	أقل من ٤	أقل من ٤
٣ – ١٠	٣٠	١٥	أقل من ٣	أقل من ٣
١٠ – ٣٠	٣٠	١٥	أقل من ٢	أقل من ٢
أكبر من أو يساوي ٣٠	٢٥	أقل من ١٠	أقل من ١	أقل من ١
* يجب تحديد الاختبارات المحددة ومتطلبات الخواص محليًا.				

يجب أن يتوافق خليط الركام للخلطة التصميمية مع متطلبات التدرج الموضحة في الجدول (٣-١٥).

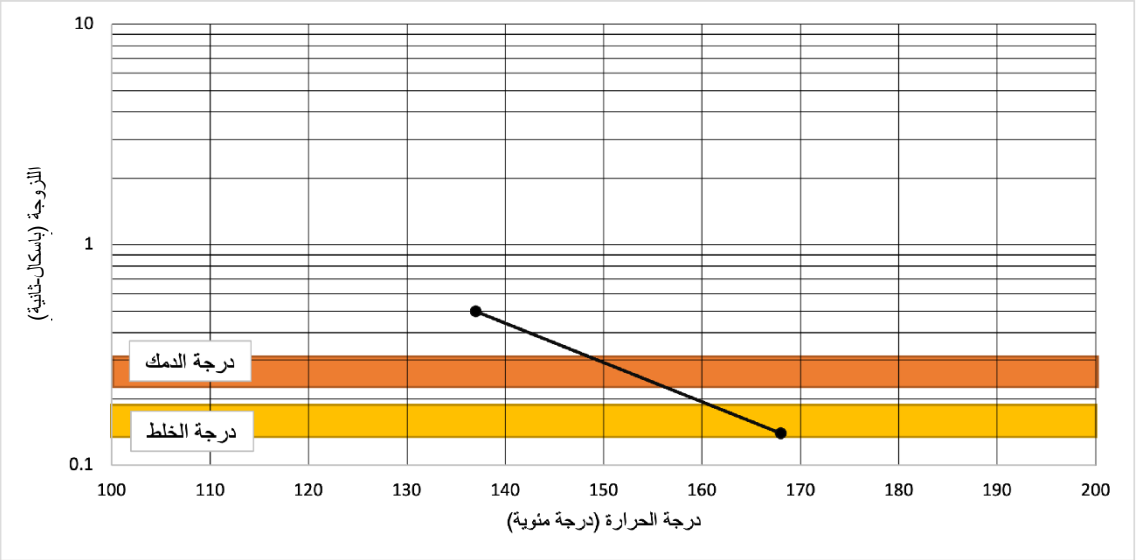
الجدول (٣–١٥) تدرج الركام - نقاط التحكم (Asphalt Institute, 2014).

مقاس المنخل (ملم)	طبقة الأساس الأسفلتية				طبقة السطح الأسفلتية							
	المقاس الاسمي الأقصى للركام											
	٣٧,٥ مم		٢٥,٠ مم		١٩,٠ مم		١٢,٥ مم		٩,٥ مم		٤,٧٥ مم	
	أدنى	أقصى	أدنى	أقصى	أدنى	أقصى	أدنى	أقصى	أدنى	أقصى	أدنى	أقصى
٥٠ (٢ بوصة)	١٠٠	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
٣٧,٥ (١,٥ بوصة)	٩٠	١٠٠	١٠٠	-	-	-	-	-	-	-	-	-
٢٥ (١ بوصة)	-	٩٠	٩٠	١٠٠	١٠٠	-	-	-	-	-	-	-
١٩,٠ (٠,٧٥ بوصة)	-	-	-	٩٠	٩٠	١٠٠	١٠٠	-	-	-	-	-
١٢,٥(٠,٥ بوصة)	-	-	-	-	-	٩٠	٩٠	١٠٠	١٠٠	-	١٠٠	-
٩,٥ (٣\٨ بوصة)	-	-	-	-	-	-	-	٩٠	١٠٠	٩٥	١٠٠	-
٤,٧٥ (رقم ٤)	-	-	-	-	-	-	-	-	٩٠	٩٠	١٠٠	-
٢,٣٦ (رقم ٨)	١٥	٤١	١٩	٤٥	٢٣	٤٩	٢٨	٥٨	٣٢	٦٧	-	-
١,١٨ (رقم ١٦)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	٣٠	٥٥
٠,٠٧٥ (رقم ٢٠٠)	٠	٦	١	٧	٢	٨	٢	١٠	٢	١٠	٦	١٣

٣-٦-١-٣ درجات حرارة الخلط والدمك بالمعمل:

يجب تحديد قيمة اللزوجة الدورانية للمادة الرابطة للأسفلت عند ١٣٥ درجة مئوية (٢٧٥ درجة فهرنهايت) و١٧٦ درجة مئوية (٣٥٠ درجة فهرنهايت) وفقًا للمواصفة (AASHTO T316)، ولمنحنى العلاقة بين اللزوجة ودرجة الحرارة المطور وفقًا للمواصفة (ASTM D2493) الشكل(٣-٥). ويُعرّف مدى درجة حرارة الخلط بالمعمل بأنه مدى درجات الحرارة التي يكون عندها للمادة الرابطة للأسفلت غير المُعمرة لزوجة دورانية قدرها (٠,١٧ ± ٠,٠٢) باسكال-ثانية. وعادة ما تُختار درجة حرارة الخلط الفعلي بالمعمل عند أو بالقرب من نقطة منتصف هذا المدى. ويُعرّف مدى درجة حرارة الدمك بالمعمل بأنه مدى درجات الحرارة التي يكون

عندها للمادة الرابطة للأسفلت غير المُعمرة لزوجة دورانية قدرها التي يكون عندها للمادة الرابطة للأسفلت غير المُعمرة لزوجة دورانية قدرها (٠,٢٨ ± ٠,٠٣) باسكال-ثانية.



الشكل (٣–٥) مخطط درجات حرارة الخلط والدمك.

وعادة ما تُختار درجة حرارة الدمك الفعلية بالمعمل عند أو بالقرب من نقطة منتصف هذا المدى.

بالنسبة للمواد الرابطة للأسفلت، تُسفر الطريقة السالف شرحها عن ارتفاع مهول في درجات الحرارة لكل من عمليتي الدمك والخلط بالمعمل. لذا، يُنصح بخيارين للمواد الرابطة للأسفلت المُحسنة (Asphalt Institute, 2014)، وهما:

- اتباع توصيات المورد، حيث حدد العديد من الموردين درجات الحرارة للخلط والدمك لكل منتج من منتجاتهم، والتي ثبت أنها ملائمة؛ أو
- إجراء اختبارات باستخدام إحدى الطريقتين التي أوصى بها تقرير (NCHRP 2010) زاوية الطور لمقياس القص الديناميكي أو تدفق القص المستقر لمقياس القص الديناميكي وتحديد درجات الحرارة المناسبة من خلال الاختبار والتحليل.

إعداد ودمك عينات الاختبار

يجب تحديد مدى مكون من ٥ مستويات مختلفة من محتوى المواد الرابطة للأسفلت بخطوات قيمة كل منها (٠,٥٪). قم بإعداد ٣ عينات لكل نسبة، بالإضافة إلى ٣ عينات أخرى لاختبار الحد الأقصى النظري للكثافة النوعية (G_{mm}) وتُعد عينات الدمك وفقًا لما نصت عليه المواصفة (ASTM D6926) لطريقة مارشال القياسية. يجب أن يكون مقاس عينة اختبار مارشال للدمك بارتفاع (٦٣,٥ ± ١,٢٧) مم، وبقطر (١٠١,٦) مم. تسري هذه الطريقة على الأسفلت المخلوط على الساخن، والتي يصل الحد الأقصى الاسمي لمقاس الركام فيها إلى (٢٥,٠) مم، أما بالنسبة لطريقة مارشال المُحسنة (ASTM D5581)، فتكون العينة بارتفاع (٩٥,٢) مم، وبقطر (١٥٢,٤) مم. تسري هذه الطريقة على الأسفلت المخلوط على الساخن، والتي يزيد الحد الأقصى الاسمي لمقاس الركام فيها عن (٢٥,٠) مم

الوزن النوعي السائب لخلطة الركام (G_{sb})

بمجرد تحديد الوزن السائب (الجاف) لكل مخزون، يُحسب الوزن النوعي السائب المركب لخلطة الركام كالتالي:

المعادلة (٣-٥)

$$G_{sb} = \frac{P_1+P_2+\cdots+P_n}{\frac{P_1}{G_1}+\frac{P_2}{G_2}+\cdots+\frac{P_n}{G_n}}$$

حيث:

G_{sb} = الوزن النوعي السائب (الجاف) للركام.

P_1, P_2, P_n = النسب حسب وزن الركام ١ و ٢ حتى n.

G_1, G_2, G_n = الوزن النوعي السائب (الجاف) للركام ١ و ٢ حتى n.

الحد الأقصى للوزن النوعي (G_{mm})

يتفاوت الحد الأقصى لحجم عينة حساب الوزن النوعي من الخلطة تبعًا لاختلاف الحد الأقصى للحجم الاسمي للركام في الخلطة محل الاختبار. ويُحسب الحد الأقصى للوزن النوعي وفقًا لما نصت عليه مواصفة (ASTM D2041).

الوزن النوعي السائب لخلطات الأسفلت المدموك (G_{mb})

يمكن تنفيذ اختبار الوزن النوعي السائب في أسرع وقت بعد أن تبرد العينة المدموكة حديثًا لتصل إلى درجة حرارة الغرفة. يُجرى هذا الاختبار وفقًا لما نصت عليه المواصفة (ASTM D1188) أو المواصفة (ASTM D2726). تُستخدم طريقة العينة المشبعة والسطح الجاف (Saturated Surface Dry , SSD) على عينات الخلطة المدموكة، التي لا يزيد معدل امتصاصها للماء عن (٢,٠) بالمائة من حجم العينة، وفقًا لما حددته المواصفة (AASHTO T166) أو المواصفة (ASTM D2726). ويمكن تحديد امتصاص الماء كما يلي:

المعادلة (٣-٦)

$$\%\ \boldsymbol{water\ absodbed\ by\ volume} = \mathbf{100} \times \frac{\boldsymbol{B-A}}{\boldsymbol{B-C}}$$

حيث:

A = الكتلة الجافة للعينة في الهواء.

B = الكتلة المشبعة والسطح الجاف للعينة في الهواء.

C = كتلة العينة في الماء.

يجب إجراء الحسابات على عينات يُشتبه في فرط ارتفاع امتصاصها للماء، بهدف تحديد أي الطرق المناسبة للاستخدام لحساب قيمة (G_{mb}). وينبغي النظر في إعداد عينة إضافية لتحديد الامتصاص.

٣-٦-١-٤ تحديد الخصائص الحجمية:

حدد الخصائص الحجمية للخلطة في كل عينة.

نسبة الفراغات الهوائية في الخلطة المدموكة:

نسبة الفراغات الهوائية (P_a): حجم الفراغات الهوائية داخل الخلطة المدموكة، مُعبرًا عنها كنسبة من إجمالي حجم الخلطة. تُشير العديد من الجهات إلى هذه النسبة بمصطلح (V_a) لأنها نسبة من الحجم عوضًا عن نسبة من الكتلة. ويمكن حساب (Pa) بالعديد من الطرق المُختلفة. والمعادلة التالية هي الأكثر استخدامًا:

المعادلة (٣-٧)

$$\boldsymbol{P_a} = \mathbf{100} - \frac{\mathbf{100} \times \boldsymbol{G_{mb}}}{\boldsymbol{G_{mm}}}$$

حيث:

P_a = حجم الفراغات الهوائية في الخلطة المدموكة، كنسبة من الحجم الإجمالي.

G_{mm} = الحد الأقصى للوزن النوعي لخلطة الرصف.

G_{mb} = الوزن النوعي السائب لخلطة الرصف.

نسبة فراغات الركام المعدني في الخلطة المدموكة

تعرف فراغات الركام المعدني (VMA) بأنها حجم الحيز الفراغي فيما بين جزيئات الركام في خلطة الرصف المدموكة الذي يتضمن الفراغات الهوائية والمحتوى الأسفلتي الفعال، معبراً عنه كنسبة مئوية من الحجم الإجمالي. تحسب فراغات الركام المعدني على أساس الوزن النوعي السائب للركام، ويُعبر عنها كنسبة من الحجم السائب لخلطة الرصف المدموكة. لذا يمكن حساب فراغات الركام المعدني بطرح حجم الركام المحسوب بوزنه النوعي السائب من الحجم السائب لخلطة الرصف المدموكة. يمكن حساب فراغات الركام المعدني بسهولة باستخدام المعادلة التالية:

المعادلة (٣-٨)

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

حيث:

VMA = الفراغات في الركام المعدني.

G_{mb} = الوزن النوعي السائب لخلطة الرصف.

P_s = نسبة الركام إلى إجمالي وزن الخلطة.

G_{sb} = الوزن النوعي السائب (الجاف) للركام.

نسبة الفراغات المملوءة بالأسفلت في الخلطة المدموكة

الفراغات المملوءة بالأسفلت (VFA) هي نسبة من حجم الفراغات في الركام المعدني، والتي يتم ملؤها بمادة رابطة فعالة. وتتشابه الفراغات المملوءة بالأسفلت مع فراغات الركام المعدني، من حيث أنها تزداد كلما أصبح الخلطة أنعم، وتغطي مساحة أكبر من مساحة سطح الركام. يُمكن حساب الفراغات المملوء بالأسفلت بأي من المعادلات التالية. يمكن حساب الفراغات المملوءة بالأسفلت بسهولة باستخدام المعادلة التالية:

المعادلة (٣-٩)

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - P_a}{VMA}$$

حيث:

VFA = الفراغات المملوءة بالأسفلت (٪).

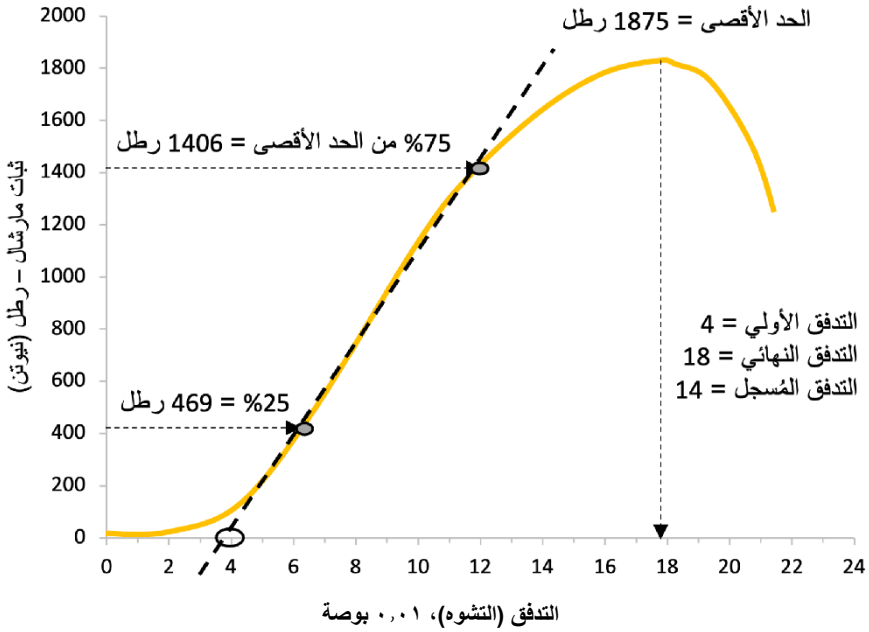
VMA = الفراغات في الركام المعدني (٪).

P_a = حجم الفراغات الهوائية داخل الخلطة المدموكة، كنسبة من الحجم الإجمالي (٪).

٣-٦-١-٥ اختبار الاستقرار والتدفق:

المعدات المطلوبة لإجراء الاختبار على عينة بقطر ١٠١,٦ مم (٤ بوصة) وارتفاع ٦٣,٥ مم (٢,٥ بوصة)، هي جهاز اختبار بالضغط، يطابق المواصفة (ASTM D6927).

ثبات مارشال هو ذروة حمل المقاومة المتحقق مع معدل تشوه ثابت. وتدفق مارشال هو مقياس للتدفق (المرن واللدن) يُحدد في أثناء اختبار الاستقرار. يؤدي تحديد تدفق مارشال باستخدام جهاز تسجيل آلي إلى إنتاج رسم مشابه للنمط الموضح في الشكل (٣-٦).



الشكل (٣–٦) تحديد تدفق مارشال.

يوضح القسم السفلي من منحنى العلاقة بين ثبات مارشال وتدفق مارشال تأثيرات عدم انتظام سطح العينة حتى تحقق التلامس الكامل (تجليس) لرؤوس الاختبار وسطح العينة. لذا فإنه عند استخدام جهاز التسجيل الآلي، يجب تصحيح تدفق مارشال المسجل بطرح جزء التدفق المتحقق خلال "تجليس" العينة (كما هو موضح في الشكل ٣-٦). لتحديد نقطة البداية الصحيحة لتسجيل التدفق، يجب رسم خط مماس يربط نقطتين على منحنى الاستقرار-التدفق، يعبر عن النسب (٢٥٪) و (٧٥٪) من استقرار مارشال. وعندما يتقاطع هذا الخط المماسي مع المحور السيني تكون هذه نقطة بداية تدفق مارشال. لا يلزم إجراء أي تصحيح عند استخدام حلقة قياس القوة ومقياس التدفق، نظرًا "لتصفير" عداد التدفق عند حد المعايرة رقم ٤ في القرص المعدني أو العينة. إذا كان التدفق عند محتوى المادة الرابطة الأمثل المُختار أعلى من الحد الأقصى المحدد، تُعد الخلطة شديدة اللدونة أو غير مستقرة. أما إذا كان التدفق أقل من الحد الأدنى المحدد، تُعد الخلطة هشة جدًا.

يجب تحويل قيم الاستقرار المقاسة للعينات والتي تنحرف كثيرًا عن السمك القياسي ومقداره ٦٣,٥ مم (٢,٥ بوصة)، إلى قيمة مكافئة إلى ٦٣,٥ مم (٢,٥ بوصة) عن طريق معامل تحويل. يعرض الجدول (٣-١٦) نسب الارتباط المُستخدمة لتحويل قيم الاستقرار المقاسة. وتجدر ملحوظة إمكانية التحويل إما على أساس السمك المقاس وإما الحجم المقاس.

الجدول (٣–١٦) نسب ارتباط الاستقرار (Asphalt Institute, 2014).

حجم العينة (سم³)	السمك التقريبي للعينة		نسبة الارتباط
	مم	بوصة	
٢٠٠ - ٢١٣	٢٥,٤	1	٥,٥٦
٢١٤ - ٢٢٥	٢٧,٠	1 1/16	٥,٠٠
٢٢٦ - ٢٣٧	٢٨,٦	1 1/8	٤,٥٥
٢٣٨ - ٢٥٠	٣٠,٢	1 3/16	٤,١٧
٢٥١ - ٢٦٤	٣١,٨	1 ¼	٣,٨٥
٢٦٥ - ٢٧٦	٣٣,٣	1 5/16	٣,٥٧

حجم العينة (سم³)	السمك التقريبي للعينة		نسبة الارتباط
	مم	بوصة	
٢٧٧ - ٢٨٩	٣٤,٩	1 3/8	٣,٣٣
٢٩٠ - ٣٠١	٣٦,٥	1 7/16	٣,٠٣
٣٠٢ - ٣١٦	٣٨,١	1 ½	٢,٧٨
٣١٧ - ٣٢٨	٣٩,٧	1 9/16	٢,٥٠
٣٢٩ - ٣٤٠	٤١,٣	1 5/8	٢,٢٧
٣٤١ - ٣٥٣	٤٢,٩	1 11/16	٢,٠٨
٣٥٤ - ٣٦٧	٤٤,٤	1 ¾	١,٩٢
٣٦٨ - ٣٧٩	٤٦,٠	1 13/16	١,٧٩
٣٨٠ - ٣٩٢	٤٧,٦	1 7/8	١,٦٧
٣٩٣ - ٤٠٥	٤٩,٢	1 15/16	١,٥٦
٤٠٦ - ٤٢٠	٥٠,٨	2	١,٤٧
٤٢١ - ٤٣١	٥٢,٤	2 1/16	١,٣٩
٤٣٢ - ٤٤٣	٥٤,٠	2 1/8	١,٣٢
٤٤٤ - ٤٥٦	٥٥,٦	2 3/16	١,٢٥
٤٥٧ - ٤٧٠	٥٧,٢	2 ¼	١,١٩
٤٧١ - ٤٨٢	٥٨,٧	2 5/16	١,١٤
٤٨٣ - ٤٩٥	٦٠,٣	2 3/8	١,٠٩
٤٩٦ - ٥٠٨	٦١,٩	2 7/8	١,٠٤
٥٠٩ - ٥٢٢	٦٣,٥	2 ½	١,٠٠
٥٢٣ - ٥٣٥	٦٥,١	2 9/16	٠,٩٦
٥٣٦ - ٥٤٦	٦٦,٧	2 5/8	٠,٩٣
٥٤٧ - ٥٥٩	٦٨,٣	1 11/16	٠,٨٩
٥٦٠ - ٥٧٣	٦٩,٨	2 ¾	٠,٨٦
٥٧٤ - ٥٨٥	٧١,٤	2 13/16	٠,٨٣
٥٨٦ - ٥٩٨	٧٣,٠	2 7/8	٠,٨١
٥٩٩ - ٦١٠	٧٤,٦	2 15/16	٠,٧٨
٦١١ - ٦٢٥	٧٦,٢	3	٠,٧٦

ملحوظات:

١.حاصل ضرب قيمة الاستقرار المقاسة للعينة في النسبة إلى سمك العينة يساوي قيمة الاستقرار المُصحح إلى عينة مقاسها ٦٣,٥ مم (٢,٥ بوصة).

٢. العلاقة بين الحجم والسمك مبنية على قطر عينة مقداره ١٠١,٦ مم (٤ بوصة)

تحديد النسبة المئوية التصميمية لمحتوى المادة الرابطة للأسفلت

تحديد ما إذا كانت خلطة الرصف بالأسفلت ستكون ملائمة عند محتوى الأسفلت التصميمي المختار يعتمد على تطبيق معايير تقييد محددة على بيانات اختبار الخلطة. يوصي معهد الأسفلت باستخدام معايير طريقة مارشال لتصميم الخلطة الواردة في الجدول (٣-١٧).

الجدول (٣–١٧) معايير مارشال لتصميم الخلطة (Asphalt Institute, 2014).

معايير طريقة مارشال[١]	مرور خفيف[٢] السطح والأساس		مرور متوسط السطح والأساس		مرور كثيف[٢] السطح والأساس	
	حد أدنى	حد أقصى	حد أدنى	حد أقصى	حد أدنى	حد أقصى
الدمك وعدد الضربات لكل طرف من أطراف العينة	٣٥		٥٠		٧٥	
الاستقرار، نيوتن (رطل)	٣,٣٣٦ (٧٥٠)	-	٥,٣٣٨ (١,٢٠٠)	-	٨,٠٠٦ (١,٨٠٠)	-
التدفق[٣،٤]، ٠,٢٥ مم (٠,٠١ بوصة)	٨	١٨	٨	١٦	٨	١٤
٪ الفراغات الهوائية[٦]	٣	٥	٣	٥	٣	٥
٪ الفراغات في الركام المعدني (VMA)[٥]	الجدول (٣-١٨)					
٪ الفراغات المملوءة بالأسفلت (VFA)	٧٠	٨٠	٦٥	٧٨	٦٥	٧٥

ملحوظات:

١- يجب مراعاة جميع المعايير، وليس قيمة الاستقرار وحدها، عند تصميم خلطة الرصف الأسفلتي.

٢- تصنيف المرور:

ظروف المرور الخفيف المتحققة من مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد التصميمي لمدة ٢٠ سنة أقل من (١٠ آلاف).

ظروف المرور المتوسط المتحققة من مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد التصميمي لمدة ٢٠ سنة يبلغ (١٠ آلاف – ١٠ ملايين).

ظروف المرور الثقيل المتحققة من مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد التصميمي لمدة ٢٠ سنة أكبر من (١٠ ملايين).

٣- تعبر قيمة التدفق عن النقطة التي يبدأ الحمل عندها في الانخفاض. عند استخدام جهاز تسجيل آلي، ينبغي تصحيح قيمة التدفق.

٤- حُددت معايير التدفق لخلطات الأسفلت الخالص. عادة ما يتم تجاوز معايير التدفق عند استخدام المواد الرابطة المُحسنة بالبوليمر أو المطاط. لذا ينبغي التغاضي عن الحد الأعلى لمعايير التدفق عند استخدام المواد الرابطة المُحسنة بالبوليمر أو المطاط.

٥- يجب حساب النسبة المئوية للفراغ في الركام المعدني على أساس مواصفة (ASTM) للوزن النوعي السائب للركام.

٦- تُستهدف النسبة المئوية للفراغات الهوائية عند ٤٪. ويمكن إدخال تعديل طفيف على ذلك لتحقيق معايير مارشال الأخرى.

الجدول (٣–١٨) الحد الأدنى للنسبة المئوية للفراغات في الركام المعدني (Asphalt Institute, 2014).

المقاس الاسمي الأقصى للجزيئات[١،٢] مم	الحد الأدنى للفراغات المملوءة بالأسفلت، ٪ الفراغات الهوائية التصميمية، نسبة[٣]		
	٣,٠	٤,٠	٥,٠
١,١٨ (رقم ١٦)	٢١,٥	٢٢,٥	٢٣,٥
٢,٣٦ (رقم ٨)	١٩,٠	٢٠,٠	٢١,٠
٤,٧٥ (رقم ٤)	١٦,٠	١٧,٠	١٨,٠
٩,٥ (٣\٨ بوصة)	١٤,٠	١٥,٠	١٦,٠
١٢,٥(٠,٥ بوصة)	١٣,٠	١٤,٠	١٥,٠
١٩,٠ (٠,٧٥ بوصة)	١٢,٠	١٣,٠	١٤,٠

المقاس الاسمي الأقصى للجزيئات[١،٢] مم	الحد الأدنى للفراغات المملوءة بالأسفلت، ٪ الفراغات الهوائية التصميمية، نسبة[٣]		
	٣,٠	٤,٠	٥,٠
٢٥,٠ (١ بوصة)	١١,٠	١٢,٠	١٣,٠
٣٧,٥ (١,٥ بوصة)	١٠,٠	١١,٠	١٢,٠
٥٠ (٢ بوصة)	٩,٥	١٠,٥	١١,٥
٦٣ (٢,٥ بوصة)	٩,٠	١٠,٠	١١,٠

ملحوظات:

١. المواصفة القياسية للمنخل المستخدمة في طريقة الاختبار، هي ASTM E11 (AASHTO M92).

٢. الحد الأقصى للمقاس الاسمي هو مقاس أكبر بمقاس واحد عن أول منخل مستخدم لاحتجاز أكثر من ١٠٪.

٣. استنتج الحد الأدنى للفراغات في الركام المعدني لقيم الفراغات الهوائية التصميمية بين تلك القيم المدرجة.

يُختار محتوى المادة الرابطة الأمثل لخلطة أسفلت الرصف بعد الأخذ بالاعتبار جميع البيانات التي سبق مناقشتها. وبصفة عامة، يوصي معهد الأسفلت باختيار محتوى الأسفلت عند النسبة الوسيطة للفراغات الهوائية، وهي ٤٪. إذا استوفت جميع الخواص المحسوبة والمقاسة لخلطة محتوى الأسفلت لمعايير تصميم الخلطة الموضحة في الجدول (٣-١٧)، فيكون هذا هو محتوى المادة الرابطة الأمثل لتصميم الخلطة.

٣-٦-٢ طريقة تصميم خلطة سوبربيف:

يمكن تلخيص خلطة سوبربيف للرصف في النقاط التالية:

١- اختيار مواد الأسفلت والركام التي تطابق معايير التصميم.
٢- تطوير خليط ركامي يلبي اشتراطات سوبربيف للرصف (هيكل الركام التصميمي)
٣- الخلط والتقادم قصير المدى للمادة الرابطة للأسفلت وخلطة الركام المُختارة.
٤- دمك العينات باستخدام جهاز الدك الدوراني عالي الأداء طبقًا لمستويات المرور المتوقعة.
٥- تحليل الخواص الحجمية للخلطة.
٦- اختيار أفضل مواد الركام وخلطة الأسفلت التي تلبي المعايير المحددة للخلطة (المحتوى الأسفلتي التصميمي)
٧- اختبار أداء الخلطة فيما يتعلق بالحساسية للرطوبة.

٣-٦-٢-١ المواد:

٣-٦-٢-١-١ المادة الرابطة للأسفلت:

تُختار المادة الرابطة للأسفلت المعدة للاستخدام في الخلطة بناءً على الظروف البيئية والأحمال المرورية. يجب اختيار درجة الأداء (PG) للمادة الرابطة للأسفلت على أساس درجات الحرارة في موقع المشروع في أي منطقة من المملكة وذلك باستخدام المعادلتين (٣-١) و (٣-٢). في حال عدم توفر معلومات حول المشروع، فيجب استخدام درجات الأداء الموضحة في الشكل (٣-٤). يجب رفع هذه الدرجة المختارة بحسب درجات الأداء المبينة في الجدول (٣-١١) طبقًا للسرعة والحجم المروري التصميمي مقاسًا بمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) في المسار التصميمي لمدة (٢٠) عامًا. يُلبي الأسفلت المستخدم بناءً على درجة الأداء متطلبات الجودة الواردة في الجدول (٣-١٢).

٣-٦-٢-١-٢ هيكل الركام التصميمي:

تنقسم خصائص الركام إلى فئتين: خواص الإجماع، وخواص المصدر. ويوصى بإجراء ٣ عينات مخلوطة بتدرجات مختلفة لخليط الركام، على الأقل. ينبغي أن يلبي الركام المركب في كل خلطة خواص الإجماع المبينة في الجدول (٣-١٣) وخواص المصدر المبينة في الجدول (٣-١٤). ينبغي ألا يتجاوز المقاس الاسمي الأقصى للركام المركب لكل خليط ركامي (½) إلى (⅓) سمك الطبقة. أما الخلطات ذات المقاس الاسمي الأقصى (٤,٧٥ و٩,٥ و ١٢,٥ و ١٩,٠) ملم فيجب استخدامها في الطبقات السطحية لخلطة الأسمنت الساخن، أما الخلطات ذات المقاس الاسمي الأقصى (٢٥,٠ و ٣٧,٥) ملم فيجب استخدامها لطبقات الأساس لخلطة الأسمنت الساخن، وذلك مالم تشترط وثائق العقد خلاف ذلك. يجب أن يلبي الركام المركب متطلبات التدرج المبينة في الجدول (٣-١٥).

بالنسبة لكل خليط ركامي يمكن للمنتجين توظيف خبراتهم في المواد أو اتباع الطريقة المبينة في الملحق (XI) من المواصفة (AASHTO R35) لتحديد محتوى المادة الرابطة الأولي التجريبي. عقب ذلك يستخدم التدريج الأفضل الذي يلبي اشتراطات خلطة سوبربيف للوصول إلى أمثل قيمة للوصول إلى المحتوى الأسفلتي التصميمي.

٣-٦-٢-٢ الدمك:

تُدمك العينات باستخدام جهاز الدمك الدوراني طبقًا للمواصفة (ASTM D6925) والمواصفة (AASHTO T312).

تذكر المواصفة (AASHTO R35) المستويات المحددة للدمك المعملي (الكثافة) على ثلاثة مستويات مختلفة من الدوران بناءً على الأحمال المرورية المتوقعة المبينة في الجدول (٣-١٩) والتي يُشار إليها بالمصطلحات ($N_{initial}$) و (N_{design}) و ($N_{maximum}$). هذه المصطلحات، التي يشيع الإشارة إليها باسم (N_{ini}) و (N_{des}) و (N_{max})، تشير لعدد الدورات المقدرة لإنتاج مستويات مختلفة من الكثافة الحقلية.

(N_{ini}) هو مقياس لقابلية دمك الخلطة، ويستند إلى الكثافة الحقلية المقدرة والمُقاسة خلف الحصيرة قبل الدمك. الخلطات التي تندمك بسرعة كبيرة التي يمكن أن تكون تكون رقيقة بطبيعتها، وهو ما يجعلها بالتالي غير مرغوبة. تتراوح مستويات الكثافة الموصوفة لـ (N_{ini}) بين (٨٩٪ - ٩١,٥٪) من (G_{mm}) بناء على المستوى المروري التصميمي. يمكن أن لا تلبي الخلطات المكونة من نسبة مرتفعة من الرمل الطبيعي أو خواص منخفضة من أوجه الركام الناعمة والخشنة هذه المتطلبات. بالرغم من أنه لا يوجد حد أدنى موصف للكثافة عند دورات (N_{ini})، فإن العكس أيضًا صحيح. الخلطات القاسية شديدة الخشونة بكثافات عند (N_{ini}) يمكن أن تصل حوالي (٨٢٪ - ٨٣٪) من (G_{mm})، يصعب دمكها بطبيعتها، وتميل إلى ارتفاع احتمالية نفاذيتها للماء. يظهر (٣-١٩) معلمات دمك سوبربيف بناءً على مستويات المرور المتوقعة من المواصفة (AASHTO R35).

(N_{des}) هو عدد الدورات المحدد للوصول لكثافة الخلطة المستهدفة ويستند إلى الكثافة الحقلية المقدرة في منتصف عمره التشغيلي. تحدد المواصفة (AASHTO M323) الكثافة المستهدفة عند نسبة (٩٦٪) من أقصى حد نظري للكثافة النوعية أو نسبة (٤٪) من الفراغات الهوائية. قامت بعض الجهات بزيادة الكثافة المستهدفة عند دورات (N_{des}) أو تقليل عدد الدورات التصميمية في محاولة لرفع النسبة المئوية للمادة الرابطة داخل الخلطة. لن تنجح هاتين الطريقتين إلا بضمان عدم تغير هيكل الركام. ومع هذا، فإن أفضل طريقة لرفع النسبة المئوية للمادة الرابطة داخل الخلطة بدون إضعاف هيكل الركام هي زيادة متطلبات الحد الأدنى لنسبة الفراغات في الركام المعدني.

أما (N_{max}) فهو تقدير للكثافة النهائية المتوقعة في الحقل في نهاية عمره التشغيلي بعد اكتساب المزيد من التكثيف الإضافي بفعل سنوات من التحميل المروري. وهي محددة عند نسبة (٩٨٪) لكل المستويات المرورية. فراغات الهواء المنخفضة في الحقل تتسبب في تكوّن خلطة لدنة تتخدد بسهولة وينبغي تلافيها. في الأصل، فإن العينات المدموكة حتى عدد دورات (N_{max}) ومستويات الكثافة بعد عدد دورات (N_{ini}) و (N_{des}) محسوبة بأسلوب الحساب التراجعي. تتسم الممارسات الحالية بدمك العينات لعدد دورات (N_{des}) وقياس الكثافة مباشرة عند هذا المستوى، ثم حساب الكثافة تراجعيًا عند دورات (N_{ini}). عقب ذلك تُدمك عينات منفصلة عند محتوى المادة الرابطة التصميمي إلى عدد دورات (N_{max}) وتُقاس الكثافة مباشرة للتأكد من مطابقة المواصفات.

يلزم تحضير العينات التالية لتنفيذ تصميم خلطة سوبربيف.

- دمك ٨ عينات على الأقل إلى (N_{des}).
- تجهيز عينتين (٢) على الأقل لإجراء اختبار الحد الأقصى النظري للكثافة النوعية (G_{mm}).
- تجهيز ٦ عينات على الأقل لاختبار الحساسية للرطوبة وفقًا للمواصفة (AASHTO T283).
- تجهيز عينتين (٢) على الأقل للتحقق عند (N_{max}).
- أي عينات أخرى مطلوبة لاختبار أداء محدد.

سيحتاج تصميم الخلطة إلى قولبة عينات الخلطة باستخدام ٤ محتويات مختلفة للمادة الرابطة، على الأقل. يوصى بقولبة العينات باستخدام محتوى المادة الرابطة التصميمي المتوقع عند النسب المئوية: (-٠,٥) و (+٠,٥) و (+١,٠) للمادة الرابطة، والتي تحصر محتوى المادة الرابطة التصميمي المتوقع. تُعرف المنهجية الموصوفة في الشكل (٣-٥) الخلط المعملي ودرجات حرارة الدمك.

الجدول (٣–١٩) مجهود الدمك الدوراني لخلطة سوبربيف.

مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) التصميمي لمدة ٢٠ سنة (بالمليون)	معلمات الدمك			تطبيقات الطرق النموذجية
	$N_{initial}$	N_{design}	$N_{maximum}$	
أقل من ٠,٣	٦	٥٠	٧٥	تشمل التطبيقات الطرق ذات أحجام المروري الخفيفة للغاية مثل الطرق المحلية والطرق الريفية وشوارع المدن حيث تُحظر حركة الشاحنات أو تكون في أدنى حد لها. تُعد الحركة المرورية في مثل هذه الطرق محلية في طبيعتها وليست إقليمية. ويمكن أن ينطبق هذا المستوى كذلك على الطرق ذات الأغراض المخصوصة والتي تخدم مواقع أو مناطق ترفيهية.
٠,٣ - ٣	٧	٧٥	١١٥	تشمل التطبيقات الطرق التجميعية وشوارع المداخل. كما يمكن أن ينطبق هذا المستوى كذلك على شوارع المدن ذات الحركة المرورية المتوسطة ومعظم الطرق الريفية.
٣ - ٣٠	٨	١٠٠	١٦٠	يمكن أن تشمل التطبيقات العديد من الطرق ذات المسارين (المفردة)، وذات المسارات المتعددة، والمقسمة، والمُتحكم بمداخلها كليًا (الطرق السريعة) أو جزئيًا (الطرق شبه السريعة). ومنها شوارع المدن ذات الحركة المرورية المتوسطة إلى الكثيفة والطرق السريعة.
أكبر من أو يساوي ٣٠	٩	١٢٥	٢٠٥	تشمل التطبيقات الطرق الريفية والحضرية على حدٍ سواء. يمكن أن ينطبق على هذا المستوى كذلك عدة استخدامات خاصة مثل محطات وزن الشاحنات أو مسارات تسلق الشاحنات على الطرق المفردة.
ينبغي أن تعتمد معلمات الدمك المعملي على مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) التصميمي لمدة ٢٠ سنة بغض النظر عن العمر التصميمي لرصف الطريق.				

٣-٦-٢-٣ تحليل بيانات سوبربيف

٣-٦-٢-٣-١ تحديد (Gmm٪) عند (N_{ini}) لكل نسبة مئوية من المادة الرابطة

هناك خطوة إضافية فريدة تميز سوبربيف هي حساب (G_{mm}٪) عند (N_{ini}) و (N_{des}) و (N_{max}). باستخدام البيانات المستقاة من جهاز الدمك الدوراني والثقل النوعي السائب المقدر للخلطة، يمكن حساب ($G_{mb,estimated}$) بناء على قطر القالب وارتفاع العينة. يمكن حساب هذ القيمة ($G_{mb,estimated}$) لكل دورة. المنتج النهائي لعملية الدمك هو عينة فعلية ذات ارتفاع معروف عند (N_{des}). الخطوات فيما يلي:

١- احصل على ارتفاع العينة عند (N_{des})، أي (h_{Ndes}).
٢- احصل على ارتفاع العينة عند (N_{ini})، أي (h_{Nini}). إن تقدير ($G_{mb,estimated}$) عند (N_{ini}) باستخدام أبعاد القالب الناعم لا يأخذ في اعتباره عدم انتظام سطح العينة. عدم الانتظام في السطح يؤخذ في الاعتبار عند وزن العينة المدموكة عند (N_{des}) فعليًا في المعمل. يمكن احتساب القيمة المقدرة لـ (G_{mb}) عند (N_{ini}) بمزيد من الدقة باستخدام عامل التصحيح التالي.
٣- احسب معامل التصحيح C على النحو التالي: ($C = h_{Ndes} / h_{Nini}$).
٤- احسب ($G_{mb,estimated}$) عند (N_{ini})، وتساوي: ($G_{mb} \times C$) عند N_{des} .
٥- حدد متوسط G_{mb} عند قيمة (N_{ini}) لكل محتوى مادة رابطة تجريبية.
٦- احسب قيم (G_{mm}٪) على النحو التالي:

المعادلة (٣-١٠)

$$\%G_{mm} = \frac{G_{mb}\ at\ N_{ini}}{G_{mm}\ (at\ the\ trial\ P_b)} \times 100$$

أو

المعادلة (٣-١١)

$$\%G_{mm} = \frac{G_{mb}\ at\ N_{des}}{G_{mm}\ (at\ the\ trial\ P_b)} \times 100$$

أو

المعادلة (٣-١٢)

$$\%G_{mm} = \frac{G_{mb}\ at\ N_{max}}{G_{mm}\ (at\ the\ trial\ P_b)} \times 100$$

حيث:

P_b = المادة الرابطة الكلية كنسبة مئوية من كتلة الخلطة.

٣-٦-٢-٣-٢ التحليل الحجمي لسوبربيف

يمكن احتساب سائر الخصائص الحجمية لحجم الفراغات الهوائية داخل الخلطة المدموكة (Pa) ونسبة الفراغات في الركام المعدني (VMA) والفراغات المملوءة بالأسفلت (VFA) على النحو المبين في القسم الفرعي (٣-٦-١-٥). معدل الغبار إلى المادة الرابطة ($P_{0.075}/P_{be}$=) في خلطة الرصف، وأحيانًا يُعرف بالمصطلح "نسبة الغبار" هو معدل النسبة المئوية من الركام الذي يمر عبر المنخل ٠,٠٧٥ مم (رقم ٢٠٠) ($P_{0.075}$) إلى المادة الرابطة الفعالة (P_{be}). تُحسب (P_{be}) باستخدام المعادلة (٣-١٣).

المعادلة (٣-١٣)

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s$$

حيث:

P_{be} = المادة الرابطة الفعالة، كنسبة مئوية من كتلة الخلطة.

P_b = المادة الرابطة الكلية، كنسبة مئوية من كتلة الخلطة.

P_{ba} = المادة الرابطة المُمتصة، كنسبة مئوية من كتلة الركام.

P_s = إجمالي الركام، كنسبة مئوية من كتلة الخلطة.

تُحتسب (P_{ba}) باستخدام المعادلة (٣-١٤):

المعادلة (٣-١٤)

$$P_{ba} = 100 \times \frac{(G_{se} - G_{sb})}{(G_{se} \times G_{sb})} \times G_b$$

حيث:

P_{ba} = المادة الرابطة المُمتصة، كنسبة مئوية من كتلة الركام.

G_{se} = الكثافة النوعية الفعالة للركام.

G_{sb} = الوزن النوعي السائب (الجاف) للركام.

G_b = الثقل النوعي للمادة الرابطة.

يتراوح المدى النموذجي المسموح به لهذه الخاصية هو (٠,٦ - ١,٢) مع مراعاة الاستثناءات التالية:

- بالنسبة للخلطات (٤,٧٥) مم، المدى المسموح به هو (٠,٩ - ٢,٠)،
- بالنسبة للخلطات ذات التدرجات الخشنة التي تكون نقاط رسم تدرجها أسفل منخل التحكم الأساسي (Primary Control Sieve) على الرسم الأسي المرفوع لأس قيمته (0.45)، ويمكن زيادة المدى المسموح به إلى (٠,٨ - ١,٦). عمومًا، تحدد هذه الخاصية قابلية مناولة (مشغولية) الخلطات الأسفلتية. عادة ما تتسبب قيمة ($P_{0.075}/P_{be}$) المنخفضة في أن تصبح الخلطة أكثر ليونة، وهو ما يضعف تماسكها ويصعب دمكها في الحقل لأنها تميل للتحرك عرضيًا تحت اسطوانة المدحلة. تميل الخلطات لمزيد من التصلب كلما ارتفعت قيمة ($P_{0.075}$)، إلا أن الارتفاع المبالغ فيه لهذه القيمة يتسبب كذلك في أن تصبح الخلطة أكثر ليونة. عادة ما تظهر في الخلطة ذات قيمة ($P_{0.075}/P_{be}$) المرتفعة العديد من شقوق الإجهاد الصغيرة خلال عملية الدمك، وتُسمى شقوق الفحص (check cracking). عادة ما تُحسب هذه الخاصية في الخلطات ذات التدريج الكثيف فقط.

تُمثل النتائج بنقاط على مخطط لرسم منحنى بالمحتوى الأسمنتي مقابل (G_{mm}٪) عند (N_{ini}) و (G_{mm}٪) عند (N_{des}) وفراغات الهواء (P_a) وفراغات الهواء في الركام المعدني (VMA)، والفراغات المملوءة بالأسفلت (VFA)، ونسبة الغبار (DP).

٣-٦-٢-٤ المحتوى الأسفلتي التصميمي

بعد رسم البيانات، سيختار المصمم محتوى مادة رابطة للأسفلت الذي سينتج (٤,٠٪) فراغات هواء عند (N_{des})، والتي تساوي ٩٦٪ من (G_{mm}) عند (N_{des}). يجب على المصمم بعد ذلك التحقق من مطابقة الخلطة للمواصفات، وذلك بتحديد قيم النسب المئوية لكل من (G_{mm}) عند (N_{ini}) وفراغات الهواء في الركام المعدني (VMA) والفراغات المملوءة بالأسمنت (VFA) ونسبة الغبار (DP) من المنحنيات الأخرى. يبين الجدول (٣-٢٠) المتطلبات الموصى بها لتصميم خلطة سوبربيف الحجمي. يلزم أن تحدد قيمة المعلمة (N_{max}) وتؤكد أن قيمة (G_{mm})عند (N_{max}) لا تتجاوز ٩٨٪.

الجدول (٣–٢٠) متطلبات خلطة سوبربيف.

مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد[1] (ESALs) التصميمي لمدة ٢٠ سنة (بالمليون)	الكثافة النوعية المطلوبة أثناء تصميم الخلطة، والنسبة المئوية للكثافة النوعية القصوى)٪(G_{mm})			فراغات الهواء في الركام المعدني (VMA)، أدنى نسبة مئوية					مدى الفراغات المملوءة بالأسفلت[2] (VFA), ٪	مدى نسبة الغبار (DP) إلى المادة الرابطة[3]
	$N_{initial}$	N_{design}	$N_{maximum}$	المقاس الاسمي الأقصى للركام، مم						
				٣٧,٥	٢٥,٠	١٩,٠	١٢,٥	٩,٥		
أقل من ٠,٣	أقل من أو يساوي ٩١,٥	٩٦,٠	≤ ٩٨,٠	١١,٠	١٢,٠	١٣,٠	١٤,٠	١٥,٠	70 - 80[4,5]	٠,٦ - ١,٢
٠,٣ - ٣	أقل من أو يساوي ٩٠,٥								65 - 78[6]	
٣ - ١٠	أقل من أو يساوي ٨٩,٠								65 - 75[5, 6, 7,]	
١٠ - ٣٠										
أكبر من أو يساوي ٣٠									65 - 75[7]	

ملحوظات:

١- مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) التصميمي هو مستوى حركة مرور المشروع المتوقعة على التصميم خلال فترة ٢٠ سنة. بغض النظر عن عمر التصميم الفعلي للطريق، حدد مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) التصميمي لمدة ٢٠ سنة.

٢- بالنسبة للخلطات ذات الركام بمقاس اسمي أقصاه ٣٧,٥ مم، يجب أن يكون الحد الأدنى المحدد من الفراغات المملوءة بالأسمنت هو ٦٤٪ لجميع مستويات حركة المرور التصميمية.

٣- بالنسبة للخلطات ذات الركام بمقاس اسمي اقصاه ٤,٧٥ مم، يجب أن ستكون نسبة الغبار إلى المادة الرابطة (١,٠ - ٢,٠)، لمستويات حركة المرور الأقل من ٣ ملايين مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) و (١,٥ - ٢,٠) لمستويات حركة المرور التصميمية التي لا تقل عن ذلك.

٤- بالنسبة للخلطات ذات الركام بمقاس اسمي أقصاه ٤,٧٥ ملم، تكون الكثافة النسبية (كأحدث جاذبية نوعية نظرية قصوى محددة) يجب أن تكون ضمن مدى (٩٤,٠٪ - ٩٦,٠٪).

٥- بالنسبة لمستويات حركة المرور التصميمية الأقل من ٣ ملايين مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) والخلطات ذات ركام بمقاس أقصاه ٢٥,٠ مم، يجب أن يكون الحد الأدنى المحدد لمدى الفراغات المملوءة بالأسمنت هو ٦٧ ٪، وبالنسبة للخلطات ذات الركام بمقاس اسمي اقصاه ٤,٧٥ مم يكون مدى الفراغات المملوءة بالأسمنت المحدد (٩٧٪ - ٦٩٪).

٦- بالنسبة لمستويات حركة المرور التصميمية الأكبر من ٣ ملايين مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) والخلطات ذات ركام بمقاس أقصاه ٢٥,٠ مم، يجب أن يكون مدى الفراغات المملوءة بالأسمنت المحدد هو (٩٧٪ - ٦٩٪).

٧- بالنسبة لمستويات حركة المرور التصميمية الذي لا يقل عن ٣ ملايين مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) والخلطات ذات ركام بمقاس أقصاه ٩,٥ مم، يجب أن يكون مدى الفراغات المملوءة بالأسمنت المحدد هو (٧٣٪ - ٧٦٪).

إذا مر تدرج الركام تحت نقطة منخل التحكم الأساسي المحددة، فيمكن أن تزيد مدى نسبة الغبار إلى المادة الرابطة من (٠,٦ – ١,٢) إلى (٠,٨ - ١,٦) وفقا لتقدير الجهة.

الخلطات التي تزيد فيها الفراغات المملوءة بالأسمنت عن القيمة الدنيا بأكثر من ٢٪ يمكن أن تكون عرضة للنزف والتخدد. ما لم تتوفر تجربة مرضية مع الخلطات ذات فراغات الهواء في الركام المعدني المرتفعة، ينبغي تجنب الخلطات التي تحتوي على فراغات هواء في الركام المعدني تتجاوز الحد الأدنى بنسبة ٢٪.

٣-٦-٢-٥ اختبار أداء الخلطة

٣-٦-٢-٥-١ الحساسية للرطوبة

ينبغي أن تكون الخلطة المصممة مستوفية لمتطلبات الحساسية للرطوبة وفقًا للمواصفة (AASHTO T283)83. طريقة الاختبار الأكثر شيوعا لتقييم حساسية خلطة الأسفلت للرطوبة هي طريقة اختبار مقاومة الشد غير المباشر، وفقً للمواصفة (AASHTO T283) والمواصفة (ASTM D4867)، والتي يشار إليها عادة باختبارات "لوتمان ورووت-تونيكلف (Lottman and Root-Tunnicliff tests) المُحسنة، على الترتيب. في هذه الاختبارات، تخضع ست عينات على الأقل للدمك لنسبة مئوية مستهدفة من فراغات الهواء التي تهدف إلى محاكاة النسبة المئوية المتوقعة في-المكان والتي تبلغ (٧,٠٪). يوصي معهد الأسفلت (المواصفة AASHTO T283) بسماحية تحضير العينات تبلغ (± ٠,٥) في المائة من فراغات الهواء على خلاف السماحية لمواصفات (ASTM) التي تبلغ نسبة (± ١,٠٪). حدد نسبة قوة الشد (TSR) لكل عينة وفقا للمواصفات المذكورة آنفًا. تُعد قيمة نسبة قوة الشد البالغة ٠,٨٠ (والتي يتم ذكرها أحيانا كنسبة ٨٠٪) أو أكثر مقبولة بشكل عام، مما يشير إلى أن خلطة الأسفلت غير قابلة للتلف بسبب الرطوبة. وعلى النقيض من ذلك، تعد قيمة نسبة قيمة الشد البالغة ٠,٦٠ (أو ٦٠٪) أو أقل غير مقبولة بشكل عام، مما يشير إلى أن خلطة الأسفلت معرضة للتلف بسبب الرطوبة.

٣-٦-٢-٥-٢ تقييم مقاومة التخدد

يمكن تقييم مقاومة التخدد باستخدام اختبار "أثر عجلة هامبورج" (Hamburg Wheel Track) وفقا للمواصفة (AASHTO T324). ينبغي تجهيز أربع عينات على الأقل مدموكة بجهاز الدمك الدوراني (قطر ١٥٠ مم)، على أن تكون نسبها متوافقة مع صيغة خلطة العمل (JMF)، أو الخليط الموصى به للركام والمادة الرابطة للأسفلت. ادمك العينات بحيث تكون نسب فراغات الهواء (٧±٠,٥٪). حدد عمق التخدد والحد الأقصى لعدد أشواط مرور العجلة حتى الفشل. يجب ألا يتجاوز عمق التخدد (١٢,٥ مم) عند الحد الأدنى لعدد دورات مرور العجلة. ستعتمد متطلبات اختبارات "أثر عجلة هامبورج" على المادة الرابطة عالية درجة الحرارة كما هو موضح في (الجدول ٣-٢١).

الجدول (٣–٢١) متطلبات اختبار أثر عجلة هامبورغ.

درجة أداء المادة الرابطة عالية درجة الحرارة	الحد الأدنى لعدد الدورات عند ١٢,٥ مم يختبر عمق التخدد عند ٥٠ درجة مئوية
درجة أداء ٦٤ أو أقل	١٠,٠٠٠ دورة
PG 70	١٥,٠٠٠ دورة
درجة أداء ٧٦ أو أعلى	٢٠,٠٠٠ دورة
الدورة الواحدة تساوي شوطي مرور (ذهاب وعودة)	

٣-٧ خرسانة الأسمنت البورتلاندي:

٣-٧-١ الأنواع:

يُعد الأسمنت البورتلاندي هو النوع الأكثر شيوعا في الاستخدام العام في جميع أنحاء العالم كمكون أساسي للخرسانة. يجب أن تطابق المواد الأسمنتية في الأسمنت البورتلاندي متطلبات الجدول (٣-٢٢).

يجب أن يخضع الأسمنت البورتلاندي للاختبارات المذكورة في المواصفة (MRDTM 504) أو المواصفة (SASO 142)، كما يجب أن تكون له قوة ضغط لعينات المونة الأسمنتية القياسية وفقا للمواصفة (ASTM C150) أو المواصفة (AASHTO M240).

الجدول (٣–٢٢) أنواع الأسمنت المستخدمة في إنشاء طبقات الرصف الأسمنتية.

نوع الأسمنت	اشتراطات المواصفات
أسمنت بورتلاندي عادي من النوع (I) أو (II) أو (III) أو (IV)	ASTM C150
أسمنت بورتلاندي عادي من النوع (V) مضاد للكبريت	ASTM C150
أسمنت بورتلاندي بوزولان من النوع (IP Pozzolan) **أسمنت بورتلاندي من النوع (I) المحسن (PM)**	(ASTM C1157) أو (AASHTO M240)

٣-٧-٢ الركام:

٣-٧-٢-١ الركام الناعم:

يجب أن يتوافق ركام الخرسانة الناعم مع المواصفة (AASHTO M6) ويجب أن يتكون من الرمل الطبيعي أو المُصنّع أو خليط منهما. يجب غسل الركام الناعم بشكل منتظم عند الحاجة من أجل الحصول على درجة النظافة الملائمة. يجب أن يلبي الركام الناعم المستخدم في الخرسانة المتطلبات التالية. يجب ألا تتجاوز المواد الضارة مثل البيريت (pyrites) أو الفحم أو الميكا (mica) ٢٪ بالوزن. يجب أن يفي الركام الناعم بمتطلبات الجدول (٣-٢٣). يجب أن يستوفي الركام الناعم متطلبات الجدول (٣-٢٤) عندما تُختبر بواسطة المواصفة (AASHTO T27).

الجدول (٣–٢٣) متطلبات الركام الناعم.

المواصفة	الحد
معامل النعومة، (AASHTO M6)	٢,٣ – ٣,١
الحد الأقصى لمتانة كبريتات الصوديوم، (AASHTO T104)، ٥ دورات (٪ الفاقد)	١٠ ٪
الحد الأقصى للكتل الطينية والجسيمات الهشة[١] (AASHTO T112)	١ ٪
اختبار الشوائب العضوية، (AASHTO T21)، مكافئ الرمل، (AASHTO T176)	أخف من المواصفة، ٧٥ كحد أدنى
التفاعل المحتمل للأسمنت والركام، (AASHTO T380)	غير ضار

ملحوظات:

١. يمكن الموافقة على الركام الناعم الذي لا يلبي تحليل المنخل ومتطلبات معامل النعومة بشرط أن يكون للخرسانة المصنوعة من الركام الناعم المماثل من نفس المصدر سجل أداء مقبول في بناء خرساني مماثل؛ أو في حال عدم وجود فترة خدمة يمكن إثباتها، شريطة إثبات أن الخرسانة هي من الفئة المحددة، المصنوعة من الركام الناعم قيد الإنشاء، سيكون لها خواص ذات صلة تساوي على الأقل خواص الخرسانة المصنوعة من نفس المكونات باستثناء ما يلي: استخدام الركام الدقيق المرجعي الذي يُختار من مصدر له سجل أداء مقبول في إنشاءات خرسانية مماثلة.

الجدول (٣–٢٤) تدرجات ركام الخرسانة الناعم.

مقاس المنخل (ملم)	النسبة المئوية المارّة بالوزن
٩,٥ (٨\٣ بوصة)	١٠٠
٤,٧٥ (رقم ٤)	٩٥ – ١٠٠
١,١٨ (رقم ١٦)	٤٥ – ٨٠
٠,٣ (رقم ٥٠)	١٠ – ٣٠
٠,١٥ (رقم ١٠٠)	٢ – ١٠
٠,٠٧٥ (رقم ٢٠٠)	٠ – ٤

إذا اختلف معامل النعومة بأكثر من (٠,٢) عن القيمة المفترضة في تصميم الخلطة الخرسانية، يجب التوقف عن استخدام هذا الركام الناعم حتى يمكن إجراء تعديلات مناسبة في نسب الخلطة للتعويض عن الفرق في التدريج.

بالإضافة إلى ما سبق ومتى أصدر المهندس تعليماته بهذا، يجب اختبار الركام الناعم وفقا للمواصفة (AASHTO T255) لتحديد المحتوى الكلي للرطوبة والمواصفة (AASHTO TP142) للرطوبة السطحية.

٣-٧-٢-٢ الركام الخشن

يجب أن يتوافق ركام الخرسانة الخشن مع المواصفة (AASHTO M80) ويجب أن يتكون من حصى أو حصى مكسر أو صخر مكسر. يجب أن يخلو الركام الخشن من مواد مثل بيريت الحديد، أو الفحم، أو الميكا، أو المواد الرقائقية، أو مواد أخرى يمكن أن تؤثر سلبا على قوة الخرسانة ومتانتها.

يجب أن يفي ركام الخرسانة الخشن بالمتطلبات التالية المبينة في الجدول (٣-٢٥).

الجدول (٣–٢٥) متطلبات الركام الخشن.

المواصفة	الحد
الحد الأقصى لمتانة كبريتات الصوديوم، (AASHTO T104)، ٥ دورات (٪ الفاقد)	٪١٢
الحد الأقصى للكتل الطينية والجسيمات الهشة (AASHTO T112)	٪ ١
الحد الأقصى للشظايا والصخور الناعمة، (AASHTO M80)	٪٥
مؤشر التقشر، (ASTM D4791)	٪١٥
التفاعل المحتمل للأسمنت والركام، (AASHTO T380)	غير ضار
اختبار لوس أنجلوس للبري ٥٠٠ دورة، (ASTM C131/C131M)(ASTM)، الحد الأقصى	٪٤٠

يجب أن يفي ركام الخرسانة الخشن بمتطلبات التدرج في الجدول (٣-٢٦) عند اختباره وفقا للمواصفة (AASHTO T27).

الجدول (٣–٢٦) تدرجات ركام الخرسانة الخشن.

مقاس المنخل (ملم)	النسبة المئوية المارّة بالوزن			
	المقاس أ ركام ٥٠ ملم	المقاس ب ركام ٦٢,٥ ملم	المقاس ج ركام ٢٥ ملم	المقاس د ركام ١٩ مم
٦٢,٥ (٢,٥ بوصة)		١٠٠		
٥٠ (٢ بوصة)	١٠٠	١٠٠ ـ ٩٥		
٣٧,٥ (١,٥ بوصة)	١٠٠ ـ ٩٥			
٢٥ (١ بوصة)		٧٠ ـ ٣٥	١٠٠	
١٩ (٠,٧٥ بوصة)	٧٠ ـ ٣٥		١٠٠ ـ ٩٥	١٠٠
١٢,٥ (٠,٥ بوصة)		٣٠ ـ ١٠		١٠٠ ـ ٩٠
٩,٥ (٨\٣ بوصة)	٣٠ ـ ١٠		٥٥ ـ ٢٠	٧٠ ـ ٤٠
٤,٧٥ (رقم ٤)	٥ ـ ٠	٥ ـ ٠	١٠ ـ ٠	١٥ ـ ٠
٢,٣٦ (رقم ٨)			٥ ـ ٠	٥ ـ ٠
٠,٠٧٥ (رقم ٢٠٠)	١ ـ ٠	١ ـ ٠	١ ـ ٠	١ ـ ٠

بالإضافة إلى ما سبق، يجب اختبار الركام الخشن وفقا للمواصفة (AASHTO T255) لتحديد محتوى الرطوبة الكلي، والمواصفة (AASHTO T85) للوزن النوعي والامتصاص، والمواصفة (AASHTO T19) لوحدة الكتلة والفراغات في الركام، حال طلب المهندس لها.

٣-٧-٢-٣ الركام المختلط

يجب الجمع بين الركام الخشن والركام الناعم المعتمد بالنسب التي يعتمدها المهندس. يجب عدم إجراء تغييرات من تدرج إلى آخر أثناء تقدم العمل إلا بعد موافقة المهندس. يجب أن يفي الركام المختلط بالمتطلبات التالية المبينة في الجدول (٣-٢٧).

الجدول (٣–٢٧) متطلبات الركام المختلط.

الخواص	المواصفة	المتطلبات
المواد التي تمر بالمنخل ٠,٠٧٥ مم حسب الوزن، ٪، الحد الأقصى	ASTM C136 AASHTO T27 MRDTM 204	٣
الكلوريدات القابلة للذوبان في الماء، ٪، الحد الأقصى	MRDTM 319	٠,٠٤
الكبريتات القابلة للذوبان في الماء، ٪، الحد الأقصى	ASTM C1580 MRDTM 318	
للخرسانة غير المسلحة		٢
للخرسانة المسلحة		١
للخرسانة مسبقة الإجهاد		٠,٥

في حال وجود أي احتمالية للتفاعل القلوي، يجب إجراء الاختبارات التالية، ما لم يوافق المهندس على خلاف ذلك:

- الانكماش: يجب ألا يتجاوز انكماش جفاف الخلطات الخرسانة المُعدّة والمُختبرة وفقًا للمواصفة (EN 1367-4) نسبة ٠,٠٤٥٪
- الفحص المجهري الصخري ووصفه، بما في ذلك التركيب التقريبي، وفقًا للمواصفة (ASTM C295).

٣-٧-٣ الماء:

يجب أن يوافق المهندس على جميع مصادر المياه المستخدمة مع الأسمنت. يجب أن تكون المياه خالية من الكميات الضارة من الزيت والقلويات والمواد النباتية والأملاح. يجب أن تكون المياه شفافة بشكل معقول ويجب ألا تحتوي على أكثر من (٠,٢٥٪) من إجمالي المواد الصلبة والعضوية عند اختبارها وفقا لمواصفة (MRDTM 514)؛ أو (ASTM D512) و (ASTM D516). يجب ألا يتجاوز الماء المستخدم في غسل الركام والخلط والمعالجة قيم الكلوريدات (Cl) والكبريتات التالية تبعا لنوع العمل (الجدول ٣-٢٨). يجب أن يتراوح الأس الهيدروجيني (pH) في الماء في الأعمال الخرسانية بين (٦,٠ و٩,٥) وفقا للمواصفة (EN ISO 10523). يجب ألا تقل درجة حرارة الماء المعد للخرسانة عن ٥ درجات مئوية ويجب ألا تزيد عن ٤٠ درجة مئوية.

الجدول (٣–٢٨) القيم القصوى من الكلوريدات والكبريتات.

نوع العمل	الكلوريدات، مجم/ لتر (جزء في المليون)	الكبريتات، مجم/ لتر (جزء في المليون)
الخرسانة غير المسلحة	٢,٠٠٠	1,500
الخرسانة المسلحة	٥٠٠	1,000
الخرسانة مسبقة الإجهاد	٥٠٠	10,000

٣-٧-٤ المضافات:

تعد المضافات مواد مضافة إلى المواد الخرسانية أثناء عملية الخلط لتحسين خواصها بحيث تتغير خصائصها بعد الصب مباشرة أو بعد تصلدها. تستخدم المضافات، إذا وافق عليها المهندس أو أصدر تعليماته باستخدامها، كوسيلة من وسائل:

- تحسين متانة الخرسانة، وزيادة مشغوليتها دون زيادة نسبة الماء/الأسمنت.
- التحكم في تأخير وقت الشك ووقت التماسك.

يمكن إضافة أربعة أنواع من المضافات إلى الخرسانة:

- المضافات الكيميائية.
- المضافات الحابسة للهواء.
- كلوريد الكالسيوم.
- المضافات المعدنية.

يجب أن يحدد كل نوع من أنواع المضافات، ويجب أن يلبي المتطلبات المحددة لنوعه، وفقا للمواصفات المبينة في الجدول (٣-٢٩).

الجدول (٣–٢٩) المواصفات المنطبقة على مختلف المضافات.

نوع المادة المضافة	المواصفة المنطبقة
المضافات الكيميائية	ASTM C494/C494M
المضافات الحابسة للهواء	ASTM C260/C260M
كلوريد الكالسيوم	AASHTO M144
المضافات المعدنية **الرماد المتطاير** **دخان السيليكا**	ASTM C618 ASTM C1240

يجب أن تكون جميع المضافات المستخدمة في العمل مصحوبة بشهادة امتثال موقعة من ممثل مسؤول عن المصنع. وفي حال استخدام أكثر من مادة مضافة، يجب أن تكون المضافات متوافقة في التركيب كما هو مستخدم في الخرسانة. يحظر استخدام المضافات الكيميائية والحابسة للهواء التي تحتوي على الكلوريدات على النحو المحدد في المواصفة (ASTM C1152) في الخرسانة المسلحة أو مسبقة الإجهاد. كما يحظر استخدام كلوريد الكالسيوم في الخرسانة التي تحتوي على أي معادن مطمورة، بما في ذلك حديد التسليح، ما لم يُحدد المهندس خلاف ذلك. يُسمح بالاستخدام الاختياري للمادة المضافة الحابسة للهواء بالكميات التي ستؤدي إلى إنتاج خرسانة بمحتوى هواء لا يتجاوز (٤٪).

كما يمكن استخدام مواد البوزولان الطبيعية كمواد مضافة، وهي مواد سليكونية أو سيليكونية وألومينية تتفاعل كيميائيًا مع هيدروكسيد الكالسيوم والماء لتكوين مركبات بخواص أسمنتية ما يعزز متانة الخرسانة وأدائها بشكل كبير. فنشاطها البوزولاني يحدد قدرتها على التفاعل، كما أنها مستدامة وأصلها من الصخور المنصهرة (الحمم). يجب أن يتوافق استخدام مواد البوزولان الطبيعية مع متطلبات الجزء الفرعي (٧-٢-٣) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق).

٣-٧-٥ معايير التصميم:

يجب أن تفي جميع المكونات الخرسانية مجتمعة و/أو منفردة بمتطلبات المتانة والمقاومة بشكل كاف، كما يجب أن توفر الخرسانة القدرة على مناولتها (مشغوليتها) أثناء التنفيذ (متطلبات أقصى مقاس للركام) والقوة أثناء الصب (متطلبات الهبوط).

٣-٧-٥-١ متطلبات المتانة:

يجب تحقيق التناسب في خلطات الخرسانة بحيث تتوافق مع أقصى نسبة للماء إلى المواد الأسمنتية والمتطلبات الأخرى مثل قوة الضغط (f'c) المحددة للخرسانة، استنادا إلى فئة التعرض المعينة للعنصر الإنشائي الخرساني. يتعين المهندس فئات التعرض وفقا لشدة التعرض المتوقع للعناصر الإنشائية الخرسانية لكل فئة تعرض وفقا للمواصفة (ACI 318)، وترد تعريفات (ACI 318) لفئات التعرض وأصناف التعرض المنطبقة في المملكة في الجدول (٣-٣٠):

- ينطبق صنف التعرض (S) على الخرسانة الملامسة للتربة والمياه التي تحتوي على كميات ضارة من أيونات الكبريت القابلة للذوبان في المياه.
- ينطبق صنف التعرض (P) على الخرسانة الملامسة للمياه التي تتطلب نفاذية منخفضة.
- ينطبق صنف التعرض (C) على الخرسانة المسلحة مسبقة الإجهاد المعرضة للظروف التي تتطلب حماية إضافية ضد تآكل حديد التسليح.

الجدول (٣–٣٠) أصناف وفئات التعرض.

الصنف	الشدة	فئة التعرض
S	منخفضة	S0
	متوسطة	S1
	شديدة	S2
	شديد للغاية	S3
P	غير منطبق	P0
	مطلوب	P1
C	غير منطبق	C0
	متوسطة	C1
	شديدة	C2

وفقا لفئات التعرض المخصصة في الجدول (٣-٣٠)، يجب أن تتوافق الخلطات الخرسانية مع المتطلبات الأكثر تقييدا المنصوص عليها في الجدول (٣-٣١) وفقا للمواصفة (ACI 318)، ما لم يوافق المهندس على خلاف ذلك.

الجدول (٣–٣١) متطلبات الخرسانة حسب فئة التعرض.

فئة التعرض	نسبة الماء إلى المواد الأسمنتية، الحد الأقصى	قوة الضغط (f'c) كجم/سم٢، الحد الأدنى
S0	غير منطبق	١٧٦
S1	٠,٥٠	٢٨٥
S2	٠,٤٥	٣١٧
S3	٠,٤٥	٣١٧
P0	غير منطبق	١٧٦
P1	٠,٥٠	٢٨٥
C0	غير منطبق	١٧٦
C1	غير منطبق	١٧٦
C2	٠,٤٠	٣٥٧

٣-٧-٥-٢ متطلبات القوة:

هناك سبع فئات معرفة من الخرسانة ويسردها الجدول (٣-٣٢). ينبغي أن تفي كل فئة خرسانة بمواصفات الحد الأدنى من محتوى الأسمنت والحد الأدنى من قوة الضغط المحددة عند (٢٨) يوما المستخدمة في حسابات التصميم الإنشائي. من المهم الإشارة إلى أن الحد الأدنى لقوة الضغط للإنشاءات تحت الأرض (للأساسات) يجب أن تكون ١٧٠ كجم/سم٢، في حين أن الحد الأدنى لقوة الضغط للإنشاءات الفوقية يجب أن يكون ٣٥٠ كجم/سم٢.

الجدول (٣–٣٢) متطلبات تسميات الفئات الخرسانية.

الفئة المحددة	الحد الأدنى للمحتوى الأسمنتي (كجم/ م٣)	الحد الأدنى لقوة الضغط المحددة عند ٢٨ يوما (كجم/ سم٢)	مقاس الركام الخشن المحدد	مقاس الركام الخشن البديل
A	٣٣٥	٢١٠	A- 50 ملم (٢ بوصة)	B
B	٣١٠	١٧٠	B- 62.5 ملم (٢,٥ بوصة)	A
C	٣٧٥	٢٥٠	C- 25 ملم (١ بوصة)	D
D	٣٧٥	٢٥٠	D- 19 ملم (٠,٧٥ بوصة)	-
E	٣٧٥	٢٨٠	D- 19 ملم (٠,٧٥ بوصة)	-
K	٣٩٠	٣١٥	D- 19 ملم (٠,٧٥ بوصة)	-
S	٤١٠	٣٥٠	D- 19 ملم (٠,٧٥ بوصة)	-

٣-٧-٥-٣ متطلبات الحد الأقصى لمقاس الركام:

المقاس الاسمي الأقصى للركام هو ألا تزيد النسبة المتبقية في أكبر منخل عن ١٠٪ من كمية الركام. وفقا للمواصفة (ACI 318)، يجب ألا يكون المقاس الاسمي الأقصى للركام أكبر من (⅕) أضيق بُعد بين جوانب القوالب (الشدّات)، و (⅓) عمق البلاطات، أو (¾) المسافة بين قضبان التسليح.

٣-٧-٦ تصميم خلطة الخرسانة:

تشجع المواصفة (ACI 318) على اتباع الخبرات الميدانية و/أو خلطات التجارب المعملية باعتبارها الطريقة المفضلة لاختيار نسب الخلطة الخرسانية. غير أنه في حال عدم توافر أو كفاية هذه المعلومات، يلزم اتباع طريقة إجراء لاختيار هذه النسب. تقدم المواصفة (ACI 211.1) طريقة توفر تقديرا تقريبيا أوليا للنسب المخصصة للفحص بواسطة مجموعات تجريبية في المعمل أو الحقل، وتعدل، وفقا لتوجيهات المهندس، لإنتاج الخصائص المطلوبة للخرسانة ذات الوزن العادي. تتكون الطريقة من الخطوات الثمانية (٨) التالية:

١- اختيار الهبوط (slump).
٢- اختيار أقصى مقاس للركام.
٣- تقدير ماء الخلط ومحتوى الهواء.
٤- اختيار نسبة محتوى الماء إلى الأسمنت.
٥- حساب محتوى الأسمنت.
٦- تقدير الركام الخشن.
٧- تقدير الركام الناعم.
٨- التعديلات لضبط رطوبة الركام.

٣-٧-٦-١ اختيار الهبوط

لتحديد الهبوط، قم بإعداد ثلاث خلطات تجريبية على الأقل وفقا لنسبة الماء إلى الأسمنت المحسوبة، ونسبة أكبر، ونسبة أقل ضمن المدى المسموح. إذا لم تحدد مواصفات المشروع مقدار الهبوط، فيمكن اختياره من الجدول (٣-٣٣) على حسب نوع المَنشأ شريطة أن يفي بالمتطلبات المحددة في المواصفة (MRDTM 516) والمواصفة (MRDTM 517) أو المواصفة (AASHTO R60) والمواصفة (AASHTO T119).

الجدول (٣–٣٣) قيم الهبوط الموصى بها لطبقات الرصف والبلاطات.

أنواع الإنشاء	الهبوط، ملم	
	الحد الأقصى	الحد الأدنى
طبقات الرصف والبلاطات	٧٥	٢٥

٣-٧-٦-٢ اختيار أقصى مقاس للركام

راجع القسم الفرعي (٣-٧-٥-٣).

٣-٧-٦-٣ تقدير مياه الخلط والهواء

الجدول (٣-٣٤) يعطي القيم المقدرة لمياه الخلط المطلوبة للخرسانة المصنوعة من أحجام قصوى مختلفة من الركام، مع أو بدون حبس الهواء.

الجدول (٣–٣٤) اشتراطات الكميات التقريبية لمياه الخلط ومحتوى الهواء في الخلطة للقيم المختلفة للهبوط والمقاسات الاسمية القصوى للركام.

الهبوط، ملم	الماء، كجم/ م³ من الخرسانة للحد الأقصى الاسمي لمقاس الركام المعطى (ملم)					
	٩,٥	١٢,٥	١٩	٢٥	٣٧,٥	٥٠
الخرسانة غير الحابسة للهواء						
٢٥ – ٥٠	٢٠٧	١٩٩	١٩٠	١٧٩	١٦٦	١٥٤
٧٥ – ١٠٠	٢٢٨	٢١٦	٢٠٥	١٩٣	١٨١	١٦٩
١٥٠ – ١٧٥	٢٤٣	٢٢٨	٢١٦	٢٠٢	١٩٠	١٧٨
الكمية التقريبية للهواء المحتجز في الخرسانة غير الحابسة للهواء، ٪	٣	٢,٥	٢	١,٥	١	٠,٥
الخرسانة الحابسة للهواء						
٢٥ – ٥٠	١٨١	١٧٥	١٦٨	١٦٠	١٥٠	١٤٢
٧٥ – ١٠٠	٢٠٢	١٩٣	١٨٤	١٧٥	١٦٥	١٥٧
١٥٠ – ١٧٥	٢١٦	٢٠٥	١٩٧	١٨٤	١٧٤	١٦٦
متوسط محتوى الهواء الإجمالي الموصى به، نسبة مئوية لمستوى التعرض:						
تعرض معتدل[1]	٤,٥	٤,٠	٣,٥	٣,٠	٢,٥	٢,٠
تعرض متوسط[2]	٦,٠	٥,٥	٥,٠	٤,٥	٤,٥	٤,٠

ملحوظات:

١- عندما يكون حبس الهواء مطلوبا لاكتساب تأثير مفيد بخلاف المتانة، مثل تحسين المشغولية أو التماسك أو في الخرسانة ذات عامل الأسمنت المنخفض لتحسين القوة، يمكن استخدام محتويات الهواء الأقل من تلك المطلوبة لضمان المتانة. يشمل هذا التعرض الخدمة الداخلية أو الخارجية في مناخ لا تتعرض فيه الخرسانة للتجمد أو لعوامل إزالة الجليد.

٢- الخدمة في مناخ يتوقع تجمده ولكن لا تتعرض فيه الخرسانة باستمرار للرطوبة أو المياه الحرة لفترات طويلة قبل تجمدها ولن تتعرض لعوامل إزالة الجليد أو أي مادة كيميائية عدوانية أخرى.

ويمكن أيضا حساب محتوى الماء والهواء المقدر للخرسانة غير الحابسة للهواء باستخدام المعادلتين (٣-١٥) و(٣-١٦)، على الترتيب.

المعادلة (٣-١٥)

$$W = \frac{218.8 \times (slump)^{0.1}}{NMAS^{0.18}}$$

حيث:

W = ماء، كجم/ م³ من الخرسانة

Slump = الهبوط، مم

NMAS= المقاس الإسمي الأقصى للركام مم

المعادلة (٣-١٦)

$$\% air = 4.4 \times 0.3475^{\left(NMAS/25.4\right)}$$

حيث:

AIR٪ = الكمية المقدرة لمحتوى الهواء، ٪.

NMAS= المقاس الإسمي الأقصى للركام، ملم.

٣-٧-٦-٤ اختيار نسبة الأسمنت/الماء (w/c ratio)

لحساب نسبة الأسمنت إلى الماء، من الضروري تحديد متوسط قوة الضغط. يجب أن يتجاوز متوسط قوة الضغط (f'_{cr}) دومًا قوة الضغط المحددة (f'_c)، والتي تستخدم في حسابات التصميم الإنشائي. وتُحسب كما في الجدول (٣-٣٥).

الجدول (٣–٣٥) العلاقة بين قوة الضغط المحددة ومتوسط قوة الضغط.

قوة الضغط المحددة، كجم/ سم²	متوسط قوة الضغط المطلوبة (f'_{cr})، كجم/ سم²
$f'_c < 204$	$f'_{cr} = f'_c + 71$
$204 \le f'_c \le 357$	$f'_{cr} = f'_c + 87$
$f'_c > 357$	$f'_{cr} = 1.10 \times f'_c + 51$

يمكن الحصول على نسبة الأسمنت/ الماء من الجدول (٣-٣٦)، يمكن الاستنتاج بين القيم عند الضرورة.

الجدول (٣–٣٦) العلاقة بين نسبة الماء إلى الأسمنت ومتوسط قوة الضغط المطلوبة.

متوسط قوة الضغط المطلوبة (f'_{cr})، كجم/ سم²*	نسبة الماء إلى الأسمنت، بالكتلة	
	خرسانة غير حابسة للهواء	خرسانة حابسة للهواء
٤٠٨	٠,٤٢	-
٣٥٧	٠,٤٧	٠,٣٩
٣٠٦	٠,٥٤	٠,٤٥
٢٥٥	٠,٦١	٠,٥٢
٢٠٤	٠,٦٩	٠,٦٠
١٥٣	٠,٧٩	٠,٧٠

المتوسط المطلوب لقيم قوة الضغط هو المتوسط المقدر لقوة الخرسانة التي تحتوي على ما لا يزيد عن ٢٪ من الهواء للخرسانة غير الحابسة للهواء و٦٪ من إجمالي محتوى الهواء للخرسانة الحابسة للهواء.

يمكن أيضا حساب نسبة الماء/الأسمنت بواسطة المعادلة (٣-١٧).

المعادلة (٣-١٧)

$$W/C = \frac{0.172+0.318\times A^{1.5}}{1-A^{1.5}}$$

حيث:

A = ثابت

المعادلة (٣-١٨)

$$A = \frac{1208.5-f'_c}{1276.5}$$

٣-٧-٦-٥ حساب محتوى الأسمنت

ويتم الحصول على الأسمنت المطلوب عن طريق المعادلة ٣-١٩. ومع ذلك، إذا كانت المواصفات تتضمن حدا أدنى منفصلا للأسمنت بالإضافة إلى متطلبات القوة والمتانة، فيجب أن يستند الخلطة على أي معيار يؤدي إلى كمية أكبر من الأسمنت.

المعادلة (٣-١٩)

$$C = \frac{W}{W/C}$$

حيث:

C = كمية الأسمنت لكل ١ م³ من الخرسانة، كجم.

w/c = محتوى الماء/الأسمنت.

W = كمية الماء لكل ١ م^3 من الخرسانة، كجم.

٣-٧-٦-٦ تقدير الركام الخشن

يُحصل على الحجم الجاف (مجفف بالقضبان) من الركام الخشن لكل متر مكعب من الخرسانة من الجدول (٣-٣٧) أو باستخدام المعادلة (٣-٢٠). أما بالنسبة للخرسانة الأقل مشغولية (قابلية المناولة)، مثل ما هو مطلوب لإنشاء الرصف الخرساني، فيمكن أن تُزاد بنسبة ١٠٪ تقريبا. أما بالنسبة للخرسانة الأكثر قابلية للمناولة، مثل ما يمكن أن يُتطلب أحيانا عندما تُصب بواسطة الضخ، فيمكن أن تُخفّض حتى نسبة ١٠٪.

الجدول (٣–٣٧) حجم الركام الخشن لكل وحدة من حجم الخرسانة.

المقاس الاسمي الأقصى للركام، (ملم)	حجم الركام الخشن الجاف (كجم/ م^3) لكل وحدة حجم من الخرسانة للحصول على معامل نعومة مختلف للركام الناعم						
	٢,٤٠	٢,٥٠	٢,٦٠	٢,٧٠	٢,٨٠	٢,٩٠	٣,٠٠
٩,٥	٠,٥٠	٠,٤٩	٠,٤٨	٠,٤٧	٠,٤٦	٠,٤٥	٠,٤٤
١٢,٥	٠,٥٩	٠,٥٨	٠,٥٧	٠,٥٦	٠,٥٥	٠,٥٤	٠,٥٣
١٩	٠,٦٦	٠,٦٥	٠,٦٥	٠,٦٣	٠,٦٢	٠,٦١	٠,٦٠
٢٥	٠,٧١	٠,٧٠	٠,٦٩	٠,٦٨	٠,٦٧	٠,٦٦	٠,٦٥
٣٧,٥	٠,٧٥	٠,٧٥	٠,٧٣	٠,٧٢	٠,٧١	٠,٧٠	٠,٦٩
٥٠	٠,٧٨	٠,٧٧	٠,٧٦	٠,٧٥	٠,٧٤	٠,٧٣	٠,٧٢
٧٥	٠,٨٢	٠,٨١	٠,٨٠	٠,٧٩	٠,٧٨	٠,٧٧	٠,٧٦
١٥٠	٠,٨٧	٠,٨٦	٠,٨٥	٠,٨٤	٠,٨٣	٠,٨٢	٠,٨١

المعادلة (٣-٢٠)

$$dry\ rodded\ vol\ of\ CA = \frac{\frac{NMAS}{25.4}}{0.327+1.226\times\left(\frac{NMAS}{25.4}\right)} + \frac{3-FM_{FA}}{10}$$

حيث:

$dry\ rodded\ vol\ of\ CA$ = حجم الركام الخشن الجاف لكل متر مكعب من الخرسانة.

NMAS = المقاس الإسمي الأقصى للركام، ملم.

FM_{FA} = معامل النعومة للركام الناعم.

إن الكتلة الجافة للركام الخشن المطلوبة للمتر المكعب من الخرسانة تساوي القيمة التي حُصل عليها من الجدول (٣-٣٧) أو المعادلة (٣-٢٠) مضروبة في كتلة الوحدة الجافة للركام كما هو موضح في المعادلة (٣-٢١).

المعادلة (٣-٢١)

$$CA = (dry\ rodded\ Vol\ of\ CA) \times (dry\ rodded\ unit\ mass\ of\ CA)$$

حيث:

CA = الوزن الجاف للركام الخشن لكمية ١ م^3 من الخرسانة، كجم.

$dry\ rodded\ unit\ mass\ of\ CA$ = كتلة وحدة جافة من الركام، كجم/م^3.

٣-٧-٦-٧ تقدير الركام الناعم

يستند هذا التقدير إلى طريقة الحجم المطلق التي تتكون من طرح الحجم الإجمالي الذي تُزيحه المكونات المعروفة من حجم الوحدة من الخرسانة (١ م^3) للحصول على الحجم المطلوب من الركام الناعم. وبمجرد معرفة حجم الركام الناعم، يمكن حساب وزنه الجاف.

يُحسب الحجم المشغول في الخرسانة بواسطة أي مكون من خلال المعادلة (٣-٢٢).

المعادلة (٣-٢٢)

$$V_m = \frac{weight_m}{\rho_w \times SG_m}$$

حيث:

V_m = حجم المادة، م^3.

$weight_m$ = وزن المادة، كجم.

ρ_w = كثافة المياه، وهي ١،٠٠٠ كجم/م^3.

SG_m = الوزن النوعي للمادة.

سيُحسب الحجم الذي يشغله الهواء في ١ م^3 من الخرسانة بواسطة المعادلة (٣-٢٣).

المعادلة (٣-٢٣)

$$V_{air} = \left(\frac{\%Air}{100}\right) \times 1m^3$$

حيث:

V_{air}= الحجم المشغول بالهواء في ١ م^3 من الخرسانة، م^3.

Air ٪= النسبة المئوية للهواء المحددة للتصميم.

يمكن حساب الحجم الذي يشغله الركام الناعم من خلال المعادلة (٣-٢٤).

المعادلة (٣-٢٤)

$$FA = V_{FA} \times \rho_w \times SG_{FA}$$

حيث:

FA= الوزن الجاف للركام الناعم، كجم لكل ١ م^3 من الخرسانة.

V_{FA} = الحجم المشغول بالركام الناعم في ١ م^3 من الخرسانة، م^3.

ρ_w = كثافة الماء الذي يبلغ ١،٠٠٠ كجم/م^3.

SG_{FA} = الوزن النوعي للركام الناعم.

٣-٧-٦-٨ التعديلات لضبط رطوبة الركام

بصفة عامة، سيكون الركام رطبًا وينبغي زيادة وزنه الجاف بنسبة المياه التي يحتوي عليها. يمكن الحصول على الوزن المعدل للركام الخشن والناعم من خلال المعادلة (٣-٢٥) والمعادلة (٣-٢٦)، على الترتيب.

المعادلة (٣-٢٥)

$$CA, adjusted = CA \times \left(1 + \left(\frac{\%CA_{moist}}{100}\right)\right)$$

حيث:

CA, adjusted = الوزن المعدل للركام الخشن، كجم لكل ١ م^3 من الخرسانة.

CA = الركام الخشن، كجم لكل ١ م^3 من الخرسانة.

$\%CA_{moist}$ = رطوبة الركام الخشن، ٪.

المعادلة (٣-٢٦)

$$FA, adjusted = FA \times \left(1 + \left(\frac{\%FA_{moist}}{100}\right)\right)$$

حيث:

FA, adjusted = الوزن المعدل للركام الناعم، كجم لكل ١ م^3 من الخرسانة.

FA = الركام الناعم، كجم لكل ١ م^3 من الخرسانة.

$\%FA_{moist}$ = رطوبة الركام الناعم، ٪.

يجب تخفيض كمية ماء الخلط المضافة إلى الدفعة بكمية تعادل الرطوبة الحرة في الركام. ويمكن حساب الوزن المعدل للماء باستخدام المعادلة ٣-٢٧.

$$W, adjusted = W - CA \times \left(\frac{\%CA_{moist} - \%CA_{Abs}}{100}\right) - FA \times \left(\frac{\%FA_{moist} - \%FA_{Abs}}{100}\right)$$ **المعادلة (٣-٢٧)**

حيث:

W, adjusted = الوزن المعدل للماء بالكيلو جرام لكل ١ م^3 من الخرسانة، كجم.

W = الماء، كجم/ م^3 من الخرسانة.

CA = الركام الخشن، كجم لكل ١ م^3 من الخرسانة.

$\%CA_{moist}$ = رطوبة الركام الخشن، ٪.

$\%CA_{Abs}$ = امتصاص الركام الخشن، ٪.

FA = الركام الناعم، كجم لكل ١ م^3 من الخرسانة.

$\%FA_{moist}$ = نسبة الرطوبة في الركام الناعم، ٪.

$\%FA_{Abs}$ = نسبة الامتصاص في الركام الناعم، ٪.

يجب رسم المنحنى البياني للعلاقة بين الخواص الأساسية (الضغط والهبوط) ونسبة الماء/الأسمنت (w/c) واختيار النسبة التي تلبي جميع المتطلبات، شريطة ألا تتجاوز الحد الأقصى المسموح به.

٤- التحليل المروري:

٤-١ المقدمة:

من العناصر الرئيسة لتصميم الرصف تقدير عدد تكرارات الأحمال المحورية التي سيتعرض لها رصف بعينه على مدار عمره التصميمي؛ حيث يساعد ذلك في تحديد التصميم الإنشائي للرصف (إلى جانب تصميم خلطة الأسفلت الساخن في حالة "سوبربيف"). ويشكل التلف الذي سيلحق بالرصف بفعل أحمال المركبات عنصر اهتمام رئيس. ومن أشهر الأساليب المتبعة هو تحويل التلف من أحمال المركبات بمختلف مقاديره وتكراراته (المرور المختلط) إلى تلف من عدد مكافئ للأحمال (القياسية) أو (المكافئة). والحمل المكافئ الأوسع انتشارًا في الولايات المتحدة الأمريكية هو ٨٠ كيلو نيوتن (١٨،٠٠٠ رطل) من الحمل المروري المكافئ للمحور المفرد (ويُشار إليه غالبًا بالاختصار ESAL). تتناول الأقسام التالية وصفًا لمبادئ المرور، ومتطلبات البيانات، والطريقة المحددة اللازمة لحساب مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد التصميمي.

٤-٢ الأحجام المرورية:

المتوسط السنوي المروري اليومي (AADT) هي أحد المقاييس الأساسية للحجم المروري. المتوسط السنوي المروري اليومي هو المتوسط السنوي لحجم المرور اليومي في الاتجاهين. ويشمل كل من المرور طوال أيام العمل في الأسبوع وفي أيام العطلات في نهاية الأسبوع، ويعبر عن إجمالي المرور السنوي على مقطع من الطريق، مقسومًا على ٣٦٥. يضم المتوسط السنوي المروري اليومي جميع فئات المركبات.

٤-٣ تصنيف المركبات:

تُصنّف المركبات إلى ثلاث مجموعات رئيسة، هي المركبات خفيفة الوزن، والمركبات ذات الوحدة الواحدة، والمركبات متعددة الوحدات. وداخل تلك المجموعات الرئيسة، يوجد ثلاث عشرة فئة للمركبات (الشكل ٤-١)، معروضة فيما يلي:

- **المركبات الخفيفة (الفئات من ١ إلى ٣):**

الفئة ١ - دراجات نارية. تشمل جميع المركبات ذات المحركات، وتسير على عجلتين أو ثلاث عجلات.

الفئة ٢ - سيارات ركاب. تشمل جميع سيارات السيدان (الصالون) والكوبيه (بيابين) والسيارة العائلية (ستيشن واجن) المصنعة خصيصًا لأغراض نقل الركاب، وتضم سيارات الركاب التي تجر مقطورات ترفيهية أو خفيفة أخرى.

الفئة ٣ – مركبات أخرى ذات وحدة مفردة ثنائية المحور ورباعية العجلات: جميع المركبات ثنائية المحاور ورباعية العجلات خلاف سيارات الركاب. ويندرج تحت هذا التصنيف الشاحنة الخفيفة ("وانيت")، وصالون (فان) نقل البضائع بدون نوافذ خلفية، والصالون العائلي (فان)، وغيرها من المركبات مثل: مركبات التخييم (كارافان)، والبيوت المتنقلة، وسيارات الإسعاف، ومركبات نقل الموتى، ومركبات نقل التراب، والحافلات الصغيرة. ويضم هذا التصنيف -أيضًا- المركبات المفردة الوحدة الأخرى ثنائية المحور ورباعية العجلات، التي تجر مقطورات ترفيهية أو خفيفة أخرى.

- **المركبات فردية الوحدة (الفئات من ٤ إلى ٧):**

الفئة ٤ - حافلات: جميع المركبات المصنعة لتكون حافلات تقليدية لنقل الركاب، وتكون ثنائية المحور، سداسية العجلات، أو ثلاثية المحاور، أو أكثر من ذلك.

الفئة ٥ – شاحنات مفردة الوحدة ثنائية المحور، سداسية العجلات: جميع المركبات المكونة من هيكل واحد، وتشمل الشاحنات ومركبات التخييم والمركبات الترفيهية، والبيوت المتنقلة، وما إلى ذلك، وتكون ثنائية المحور وبعجلات خلفية مزدوجة.

الفئة ٦ – شاحنات مفردة الوحدة ثلاثية المحاور، سداسية العجلات: جميع المركبات المكونة من هيكل واحد، وتشمل الشاحنات ومركبات التخييم والمركبات والترفيهية، والبيوت المتنقلة، وما إلى ذلك، وتكون ثلاثية المحاور.

الفئة ٧ – شاحنات مفردة الوحدة رباعية المحاور فما أكثر: جميع الشاحنات فردية الهيكل وتكون رباعية المحاور فما أكثر.

- **المركبات متعددة الوحدات (الفئات من ٨ إلى ١٣).**

الفئة ٨ – شاحنات بمقطورة واحدة رباعية المحاور أو أقل،: جميع المركبات المكونة من أربعة محاور أو أقل، وتتألف من وحدتين، أولاهما القاطرة أو وحدة شاحنة قطر مستقيمة (بدون مفصل).

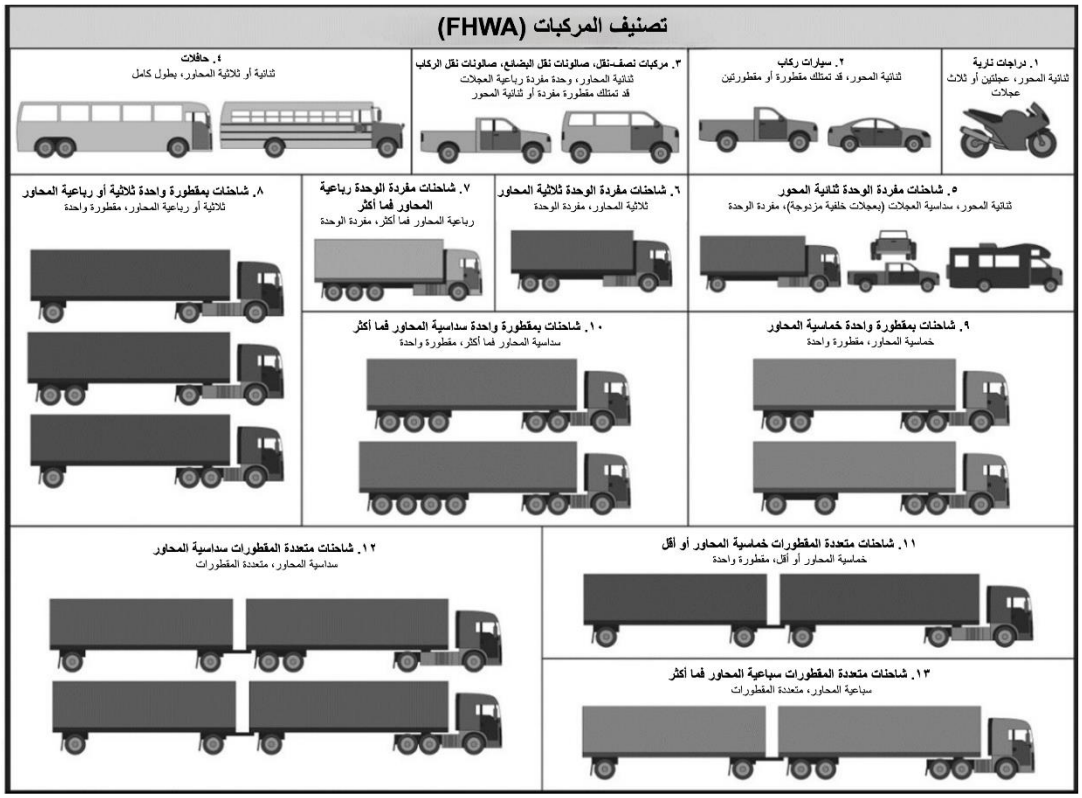
الفئة ٩ – شاحنات بمقطورة واحدة خماسية المحاور: جميع المركبات المكونة من خمسة محاور ووحدتين، إحداهما القاطرة (مزودة بمفصل) أو وحدة شاحنة قطر مستقيمة (بدون مفصل).

الفئة ١٠ – شاحنات بمقطورة واحدة سداسية المحاور أو أكثر،: جميع المركبات المكونة من ستة محاور أو أكثر، وتتألف من وحدتين، أولاهما القاطرة (مزودة بمفصل) أو وحدة شاحنة قطر مستقيمة (بدون مفصل).

الفئة ١١ – شاحنات متعددة المقطورات خماسية المحاور أو أقل،: جميع المركبات المكونة من خمسة محاور أو أقل، وتتألف من ثلاث وحدات أو أكثر، إحداها هي القاطرة (مزودة بمفصل) أو وحدة شاحنة قطر مستقيمة (بدون مفصل).

الفئة ١٢ – شاحنات متعددة المقطورات سداسية المحاور،: جميع المركبات المكونة من ستة محاور وثلاث وحدات أو أكثر، إحداها القاطرة (مزودة بمفصل) أو وحدة شاحنة قطر مستقيمة (بدون مفصل).

الفئة ١٣ – شاحنات متعددة المقطورات سباعية المحاور أو أكثر،: جميع المركبات المكونة من سبعة محاور أو أكثر، وتتألف من ثلاث وحدات أو أكثر، إحداها هي القاطرة (مزودة بمفصل) أو وحدة شاحنة قطر مستقيمة (بدون مفصل).



الشكل (٤–١) مخطط تصنيف المركبات للإدارة الاتحادية (الأمريكية) للطرق (FDOT, 2018).

٤-٤ الأوزان القصوى للمركبة والمحاور في المملكة العربية السعودية:

وفقًا لمواصفة الهيئة السعودية للمواصفات والمقاييس والجودة رقم 469 (SASO 469)، يجب ألا يتجاوز الوزن الأقصى للشاحنة أو الحافلة أو الشاحنة المزودة بمقطورة، أو القاطرة المزودة بمقطورة، أو أي تركيبة أخرى مسموح بها ٤٥ طنًا. يجب ألا يتجاوز الوزن الأقصى للمحور المفرد المزود بإطار (عجلة) واحد على كل جانب منه والقابل للتوجيه ٨ أطنان وبإطار مزدوج (عجلتين) على كل جانب منه ١٠ أطنان و١٣ طناً للمحور المفرد غير القابل للتوجيه. ويجب أن يكون الوزن الأقصى على محورين متجاورين (محور ترادفي) وفقًا للجدول (٤-١).

الجدول (٤–١) أقصى وزن على محورين متجاورين (محور ترادفي).

المسافة بين المحورين المتجاورين (محور ترادفي) (م)	الوزن الأقصى المسموح به على المحورين المتجاورين (طن)
٠,٩ – ١,٠٠	١٤,٧

المسافة بين المحورين المتجاورين (محور ترادفي) (م)	الوزن الأقصى المسموح به على المحورين المتجاورين (طن)
١,٠٠ – ١,١٠	١٦,١
١,١٠ – ١,٢٠	١٧,٥
١,٢٠ – ١,٣٠	١٨,٩
١,٣٠ – ١,٣٥	٢٠,٣
١,٣٥ – ٢,٥٠	٢١,٠
أكبر من ٢,٥٠	يُتعامل مع كل محور ترادفي على أنه محور واحد

يجب أن يكون الوزن الأقصى المسموح به لثلاثة محاور متجاورة (محور ترادفي) وفقًا للجدول (٤-٢).

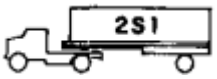
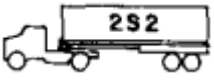
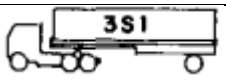
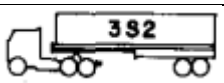
الجدول (٤–٢) الوزن الأقصى المسموح به لثلاثة محاور متجاورة (ترادفيًا).

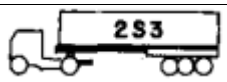
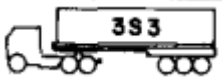
المسافة بين المحور الأول والثالث (م)	أقصى وزن مسموح به على المحاور الثلاثة المجاورة (طن)
أقل من أو يساوي ٣ م	٢٦
أكبر من ٣ م	٣٢

بالنسبة للمركبات ذات الأبعاد و/أو الأوزان التي تتجاوز الحدود المُعطاة والضروري استخدامها، يجب الحصول على موافقة من الجهات المسؤولة عن النقل قبل إعطاء الإذن باستخدامها على الطرق.

الأوزان النظامية للشاحنات حسب وزارة النقل والخدمات اللوجستية (المواصلات سابقًا) مُعطاة في الجدول (٤-٣).

الجدول (٤–٣) الأوزان النظامية للشاحنات حسب وزارة النقل والخدمات اللوجستية (المواصلات سابقًا).

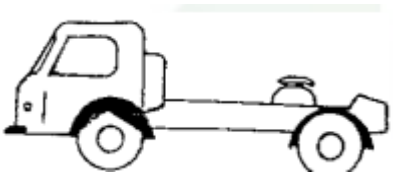
فئة الشاحنة	نوع الشاحنة	الوزن الإجمالي الأقصى (طن)	أقصى وزن للمحور (طن)						الأبعاد		
			المحور						الطول (م)	العرض (م)	الارتفاع (م)
			١	٢	٣	٤	٥	٦			
١		19	6	13	-	-	-	-	11	2.5	4
٢		26	6	10	10	10	-	-	12	2.5	4
٣		32	6	13	13	13	-	-	18	2.5	4
٤		39	6	13	10	10	-	-	18	2.5	4
٥		39	6	10	10	10	-	-	18	2.5	4
٦		40	6	10	10	10	10	-	18	2.5	4

٧		40	6	13	7	7	7	-	18	2.5	4
٨		40	6	10	10	10	7	7	18	2.5	4

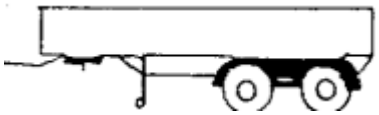
توضح الأشكال (٤-٢) إلى (٤-٩) أنواع المركبات (مقطورة، قاطرة، مقطورة، حافلة، شاحنة، شاحنة مزودة بمقطورتين من النوع (أ)، شاحنة بمقطورة مزودة بمقطورتين من النوع (ب)، وشاحنة مزودة بمقطورتين من النوع (ج) وفقًا لمواصفة الهيئة السعودية للمواصفات والمقاييس والجودة رقم 469 (SASO 469).



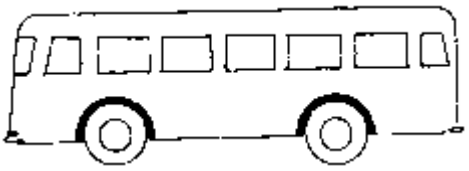
الشكل (٤–٢) مقطورة.



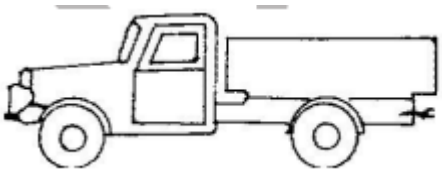
الشكل (٤–٣) قاطرة.



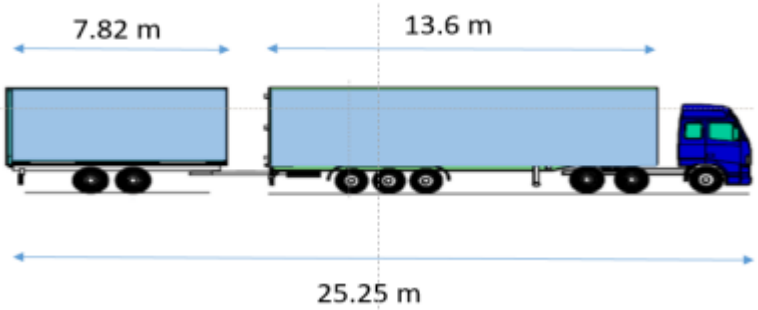
الشكل (٤–٤) مقطورة.



الشكل (٤–٥) حافلة.

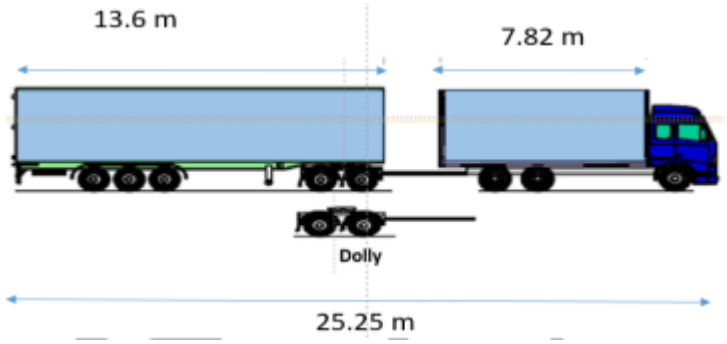


الشكل (٤–٦) شاحنة.

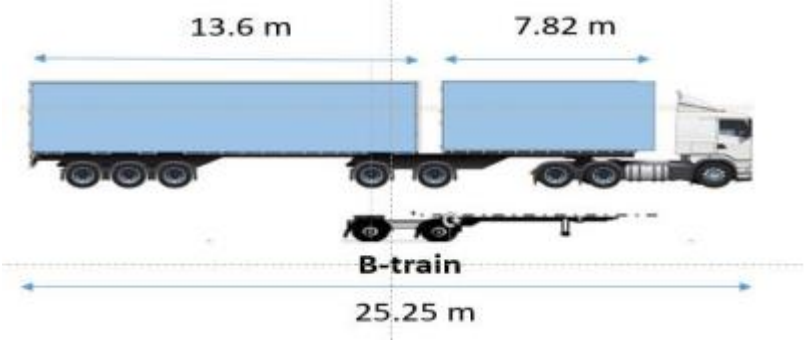


الشكل (٤–٧) شاحنة مزودة بمقطورتين من النوع (أ): قاطرة ومقطورة أولى ومقطورة ثانية ذات محور مركزي. ينبغي أن تحتوي القاطرة على محورين خلفيين على الأقل.

٤



الشكل (٤–٨) شاحنة مزودة بمقطورتين من النوع (ب): شاحنة وعربة (Dolly) ومقطورة. ينبغي أن تحتوي الشاحنة على محورين خلفيين على الأقل.



الشكل (٤–٩) شاحنة مزودة بمقطورتين من النوع (ب): قاطرة، مقطورة مسطحة (B-train) ومقطورة ثانية. ينبغي أن تحتوي القاطرة على محورين خلفيين على الأقل.

٤-٥ توزيع فئات المركبات:

تُسلط المركبات مختلفة المقاس والوزن أحمالا مختلفة على الهيكل الإنشائي للرصف؛ لذا فإنه من الضروري معرفة حجم كل فئة مركبات ستستخدم الطريق. ومثاليًا، سيأتي هذا التوزيع من بيانات الوزن-في أثناء-الحركة (Weigh-In-Motion, WIM) على مقطع الطريق محل الدراسة. ومع ذلك، يكون ألا تتوفر بيانات الوزن في أثناء الحركة بصورة كافية، ويلزم تحديد توزيع فئات المركبات باستخدام البيانات المتاحة الأخرى. ونظرًا لأن المركبات خفيفة الوزن (الفئات من ١ إلى ٣) تُسلط أحمالا مهملة على الهيكل الإنشائي للرصف، فليس من الضروري توزيع تلك المركبات إلى فئات تصنيفها لأغراض تصميم الرصف. وبدلا من ذلك، تكون

فئات المركبات من ٤ إلى ١٣ هي محل الاهتمام الرئيس، نظرًا لأوزانها وما تخلفه من أضرار على الرصف.

٤-٦ نسبة المركبات الثقيلة:

نسبة المركبات الثقيلة هي النسبة من متوسط الحجم السنوي المروري اليومي للشاحنات أو المركبات التجارية. ويشتمل ذلك على فئات المركبات من ٤ إلى ١٣.

٤-٧ معدل النمو السنوي:

معدل النمو السنوي (r) هو متوسط معدل النمو السنوي لحركة المرور. ويمكن استخدامه للحصول على تنبؤات حركة المرور بصفة عامة على مدار السنوات المستقبلية، بالإضافة إلى حساب معامل النمو. ويمكن استخدام المعادلة التالية:

$$\mathbf{AADT_n = AADT_a \times (1 + r)^{(n-a)}}$$ **المعادلة (٤-١)**

حيث:

$AADT_n$ = المتوسط السنوي المروري اليومي للسنة n.

$AADT_a$ = المتوسط السنوي المروري لسنة الأساس.

ينبغي تعيين معدل نمو مستقل لكل فئة مركبات. أما إذا لم تكن البيانات متاحة؛ فيُستخدَم معدل نمو واحد لجميع أنوع المرور. وفي ظل غياب البيانات الكافية واللازمة لحساب تلك النسبة يمكن استخدام معدل نمو سنوي لحجم المرور بقيمة تتراوح بين ٢٪ إلى ٤٪.

٤-٨ معامل النمو:

يُستخدم معامل النمو (GF) لتحويل حجم المرور السنوي إلى حجم مروري تراكمي على امتداد عمر التصميم. ويُبنى معامل النمو على معدل النمو المركب على امتداد عمر التصميم، ويُحسَب بالمعادلة التالية:

$$\boldsymbol{GF = \frac{(1+r)^Y - 1}{r}}$$ **المعادلة (٤-٢)**

حيث:

GF = معامل النمو.

Y = عمر التصميم (بالسنوات).

r = معدل النمو (بالقيمة العشرية).

٤-٩ معاملات مكافئ الحمل:

تُستخدم معاملات مكافئة الحمل (LEF) لتحويل حمل مركبة واحدة من فئة محددة إلى عدد مكافئ من الأحمال المكافئة لمكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL). للمزيد من التفاصيل، راجع الجزء الفرعي (٥-٢-٤) والجزء (٦-٤).

٤-١٠ مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) التراكمية:

في ضوء ما سبق، تُحسَب وحدات مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) التراكمية للاتجاهين على مقطع محدد من الطريق خلال فترة التحليل (W_{18}) باستخدام المعادلة التالية.

$$\boldsymbol{w_{18} = \sum_{i=4}^{13} AADT_i \times GF_i \times LEF_i}$$ **المعادلة (٤-٣)**

حيث:

$AADT_i$ = الحجم المروري لكل فئة مركبات (من الفئة ٤ إلى ١٣).

GF_i = معامل النمو لكل فئة مركبات (من الفئة ٤ إلى ١٣).

LEF_i = معامل مكافئة الحمل لكل فئة مركبات (من الفئة ٤ إلى ١٣).

لتحديد قيمة المرور (w_{18}) في مسار التصميم، ستستخدم المعادلة (٥-٤) (الجزء الفرعي ٥-٢-٤).

٥- التصميم الإنشائي للرصف المرن:

٥-١ الطريقة:

٥-١-١ تصنيفات الطرق:

تُصنَّف الطرق تبعًا للتصنيف الوظيفي في كود الطرق السعودي ٢٠١ (عملية التخطيط) وتصنيف التصميم في كود الطرق السعودي ٣٠١ (التصميم الهندسي للطرق) ويلاحظ وجود استثناء في حالة الطرق الصناعية، والتي تتميز من حيث تصميم الرصف كما يلي:

الطرق الصناعية: وظيفة هذه الطرق هي تأمين تدفق المروري داخل المناطق الصناعية، والربط بين تلك المناطق والطرق من الأنواع الأخرى. ويشتمل ذلك على الطرق داخل المناطق الصناعية، وطرق كل من محطات الحافلات، ومحطات السكك الحديدية والمطارات والموانئ. يمكن ألا تكون أحجام المرور ضخمة، لكن ترتفع بها نسبة المركبات الثقيلة؛ لذا يجب التعامل معها عند تصميم طبقات الرصف، على أنها طرق شريانية أو سريعة.

وبناءً عليه، تُصنّف الطرق إلى التصنيفات التالية:

١- طرق سريعة.
٢- طرق شبه سريعة.
٣- طرق شريانية.
٤- طرق تجميعية.
٥- طرق محلية.
٦- طرق صناعية.

ولأغراض تصميم الرصف تُجمَع تصنيفات الطرق تبعًا لإجمالي مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) المتوقع للمشروع، على مسار التصميم على مدار عمر التصميم، كما هو موضح في الجدول (٥-١).

٥-١-٢ المرور على الطرق:

لأغراض التصميم، يُعرَّف مؤشر المرور بأنه قيمة إجمالي مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) المتوقع للمشروع على مسار التصميم على مدار عمر التصميم. يعرض الجدول (٥-١) توزيع تصنيفات المرور إلى جانب مدى مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) (Transport Ministry, 2020).

الجدول (٥–١) مدى مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) في المسار التصميمي وفئات تصنيف المرور.

فئة تصنيف المرور		مدى مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs)، بالمليون	التطبيقات
VL	**خفيف جدًا**	أقل من ٠,٣	الطرق المحلية خفيفة المرور، والطرق المحلية التي بدون شاحنات.
L	**خفيف**	٠,٣ - ٣	الطرق المحلية والشريانية/التجميعية.
M	**متوسط**	٣ - ١٠	الطرق الشريانية/التجميعية.
H	**مرتفع**	١٠ - ٢٠	الطرق السريعة والطرق شبه السريعة.
VH	**مرتفع جدًا**	٢٠ - ٣٠	الطرق السريعة والطرق شبه السريعة والطرق الصناعية.

فئة تصنيف المرور		مدى مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs)، بالمليون	التطبيقات
EH	**مرتفع للغاية**	أكبر من ٣٠	الطرق السريعة والطرق شبه السريعة والطرق الصناعية مرتفعة الحركة المرورية للغاية.

٥-١-٣ إطار اختيار طريقة التصميم:

تُستخدم الطرق الثلاث التالية في التصميم الإنشائي للرصفيات المرنة:

- طرق التصميم التجريبي للرصفيات – منفّذة حاليًا.
- طرق التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف – ستُنفذ في المستقبل القريب.
- المقطع العرضي الثابت للرصف (القطاعات القياسية) – منفذة على مدى واسع حاليًا.

يعرض الجدول (٥-٢) طريقة تصميم الرصف الواجب اتباعها وفقًا لفئة تصنيف المرور (الجدول ٥-١).

الجدول (٥–٢) طرق التصميم المسموح بها لإنشاء الرصف المرن الجديد.

الفئة		VL	L	M	H	VH	EH
مدى مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) (بالمليون)		أقل من ٠,٣	٠,٣ - ٣	٣ - ١٠	١٠ - ٢٠	٢٠ - ٣٠	أكبر من ٣٠
طريقة التصميم	التجريبية (AASHTO)	اختياري[١]		اختياري[١]			
	الميكانيكية-التجريبية (MEPDG)[٣]	لا ينطبق[٢]		اختياري[١] - مستقبلًا[٣]	إلزامي - مستقبلًا[٣]		
	المقطع العرضي الثابت	يوصى به[٤]		يوصى به[٤]			

ملحوظات:

١- غير مُلزمة، ولكن ينبغي استخدامها للتحقق من التصميم أو تحسينه نحو الأمثل. عند تطبيق أكثر من طريقة تصميم، فإن اختيار الطريقة التي ستُطبق سيعتمد على الحكم الهندسي.

٢- غير ملائمة للاستخدام.

٣- يجب اتباع الطريقة الميكانيكية-التجريبية (MEPDG) بعد المعايرة لتناسب الظروف المحلية.

٤- طريقة مقترحة من ضمن الطرق المسموح بها.

في حالة عدم توفر مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) أو لا يمكن حسابها (لا توجد بيانات كافية أو موثوقة)، يوصى باستخدام طريقة تصميم المقاطع العرضية للرصيف الثابت للتنفيذ. سيتم اختيار المقطع العرضي المناسب بناءً على حكم هندسي لتعيين الفئة المناسب (الجدول ٥-١).

٥-٢ الطريقة التجريبية لتصميم الرصف:

٥-٢-١ طريقة (AASHTO) التصميمية:

تعتمد طرق التصميم التجريبي للرصف حصريًا على نتائج التجارب والخبرات السابقة حيث تُستخدم مشاهدات استجابة الرصف لأحمال المرور المعلومة وظروف القاعدة الترابية، لإيجاد الارتباطات بين مدخلات تصميم الرصف وأداء الرصف.

تعتمد طريقة (AASHTO) للتصميم التجريبي على العلاقات التجريبية بين الأحمال المرورية والمواد وأداء الرصف التي طُورت من اختبار الطريق الخاص بـ (AASHTO). أعد دليل لإعطاء توصيات بخصوص تحديد الهيكل الإنشائي للرصف على النحو الموضح في الشكل (٥-١) (AASHTO, 1993).



الشكل (٥–١) مقطع نموذجي للهيكل الإنشائي للرصف المرن.

تتضمن طريقة التصميم البنود التالية:

- أداء الرصف.
- المرور.
- تربة القاعدة الترابية.
- مواد الإنشاء.
- البيئة.
- صرف المياه.
- الموثوقية.
- الانحراف المعياري الإجمالي.

٥-٢-٢ معايير التصميم:

يهتم هذا المجلد بصفة أساسية بالأداء الوظيفي والإنشائي. يتعلق الأداء الإنشائي للرصف بالظروف المادية (حدوث تشقق أو تشقق أو تصدع أو غير ذلك)، والتي يكون لها تأثير سلبي على قدرة الهيكل الإنشائي للرصف على تحمّل الأحمال، أو يكون بحاجة إلى صيانة. أما الأداء الوظيفي للرصف فيهتم بمدى جودة الخدمة التي يوفرها الطريق للمستخدم. وفي هذا السياق، تكون جودة الركوب هي السمة المُهيمنة. ولقياس جودة الركوب كميًا، طُور مفهوم "قابلية الخدمة". يُعبر عن قابلية الخدمة للرصف من خلال مؤشر قابلية الخدمة الحالي (PSI). يُحصل على مؤشر قابلية الخدمة الحالي (PSI) من قياس الخشونة والعيوب (التشقق والترقيع وعمق التخدد) عند وقت محدد من عمر خدمة الرصف. فالخشونة هي العامل المهيمن في تقدير مؤشر قابلية الخدمة الحالي (PSI) للرصف.

تتراوح قيم قابلية الخدمة الحالية للرصف بين ٠ إلى ٥، بحيث تعبر القيمة ٥ عن أعلى مؤشر لقابلية الخدمة. تتمثل فلسفة التصميم الأساسية في مفهوم قابلية الخدمة-الأداء، والذي يوفر وسيلة لتصميم رصف بناء على حجم مروري إجمالي محدد وحد أدنى من مستوى قابلية الخدمة المطلوب في نهاية فترة التصميم. يعتمد اختيار أقل قيمة مسموح بها لمؤشر قابلية الخدمة الحالي (PSI)، أو بمعنى آخر مؤشر قابلية الخدمة النهائية (p_t) على أدنى مؤشر سيُتحمل قبل أن تصبح إعادة التأهيل أو إعادة إنشاء طبقة السطح أو إعادة الإنشاء ضرورية. يمكن وضع معيار واحد لتحديد الحد الأدنى لقابلية الخدمة على أساس قبول العموم الجدول (٥-٣) ويعرض

الجدول (٥-٤) مستويات قابلية الخدمة النهائية المتوافقة مع تصنيف الطريق المعروض في الجزء الفرعي (٥-١-١) المقرر اعتماد العمل بها في المملكة العربية السعودية.

الجدول (٥–٣) مستوى قابلية الخدمة النهائية وقبول العموم (AASHTO,1993).

مؤشر قابلية الخدمة النهائية	نسبة الأفراد المُعبرين عن عدم قبولهم
٣,٠	١٢
٢,٥	٥٥
٢,٠	٨٥

الجدول (٥–٤) المستويات الموصى بها لقابلية الخدمة النهائية.

تصنيف الفئة	مؤشر قابلية الخدمة النهائية
VL	٢,٠
L	٢,٠
M	٢,٥
H	٢,٥
VH	٣,٠
EH	٣,٠

مؤشر قابلية الخدمة الأولية (p_i) هو قيمة تقديرية من قبل المستخدم، لما سيكون عليه مؤشر قابلية الخدمة الحالية فورًا بعد الانتهاء من أعمال الإنشاء. وتبلغ القيمة المقترحة للمؤشر(p_i) للرصفيات المرنة (٤,٢). وبمجرد تحديد قيمة (p_i) و (p_t)، ينبغي تطبيق المعادلة التالية لحساب إجمالي التغير في مؤشر قابلية الخدمة:

$$\Delta PSI = p_i - p_t$$

المعادلة (٥-١)

فيما يلي معادلة التصميم الأساسية المستخدمة للرصفيات المرنة:

$$log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9.36 \times log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40+\frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times log_{10}(M_R) - 8.07$$

المعادلة (٥-٢)

حيث:

w_{18} = العدد المتوقع لتطبيقات مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد البالغ ٨,١٦ طن (١٨ كيلو رطل).

Z_R = الانحراف الطبيعي المعياري.

S_o = الخطأ المعياري للتنبؤ بالمرور والأداء مجتمعة.

ΔPSI = الفرق بين مؤشر قابلية الخدمة للتصميم الابتدائي، (p_i)، ومؤشر قابلية الخدمة النهائية للتصميم، (p_t).

M_R = معامل المرونة، (رطل لكل بوصة مربعة).

يعبر الرقم الإنشائي (SN) عن إجمالي سمك الرصف المطلوب.

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3$$ **المعادلة (٥-٣)**

حيث:

$a_{1, 2, 3}$ = معاملات الطبقة لكل من طبقة السطح الأسفلتية-الخرسانية، وطبقة الأساس، وطبقة ما تحت الأساس، على الترتيب.

$D_{1, 2, 3}$ = سمك كل من طبقة السطح الأسفلتية-الخرسانية، وطبقة الأساس، وطبقة ما تحت الأساس (بالبوصة)، على الترتيب.

$m_{2, 3}$ = قيمة معامل الصرف لطبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس، على الترتيب.

٥-٢-٣ العمر التصميمي:

يُشير العمر التصميمي (فترة التحليل) إلى المدة الزمنية التي سيُجرى لها التحليل، أي الفترة الزمنية التي يجب أن تغطيها أي استراتيجية تصميم. يعرض الجدول (٥-٥) فترة التحليل الموصى بها لمختلف ظروف الطريق.

الجدول (٥–٥) العمر التصميمي (فترة التحليل) (AASHTO, 1993).

ظروف الطريق	فترة التحليل (بالسنوات)
حضري مرتفع الحجم المروري	٣٠ – ٥٠
ريفي مرتفع الحجم المروري	٢٠ – ٥٠
مُعبّد منخفض الحجم المروري	١٥ – ٢٥
ذو سطح ركامي منخفض الحجم المروري	١٠ – ٢٠

وستُصمم الرصفيات المرنة وتُحلل لمدة خدمة تبلغ ٢٠ عامًا. ولإطالة العمر التصميمي، ينبغي النظر في تضمين عملية إعادة تأهيل واحدة.

٥-٢-٤ الأحمال المرورية:

تتطلب المعادلات التصميمية المستخدمة في دليل التصميم التجريبي لـ (AASHT0) معلومات مرورية تشمل: الأحمال المحورية وترتيب المحاور وعدد مرات تطبيقها. ويمكن تمثيل التأثير الضار لمرور محور ما بأي وزن بما يكافئ الرقم (٨,١٦) طن (١٨ ألف رطل) للحمل المروري المحوري المفرد (ESALs). لذا، يجب تحويل المرور المختلط إلى عدد مكافئ للرقم (٨,١٦) طن (١٨ ألف رطل) من أحمال المحور المفرد. وتشمل طريقة تحقيق ذلك ما يلي:

- اشتقاق عوامل مكافئ حمل المحور،
- تحويل المرور المختلط إلى عدد مرات تطبيق مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) البالغ (٨,١٦) طن (١٨ ألف رطل)
- اعتبارات توزيع المرور على مسارات الطريق المختلفة.

للتعبير عن أحمال المحاور المتفاوتة بمعلمة تصميم واحدة، يلزم تطوير عوامل مكافئ حمل المحور. هذه العوامل عند ضربها في عدد أحمال المحور ضمن فئة وزن معينة، تعطي عدد مرات تطبيق مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) البالغ (٨,١٦) طن (١٨ ألف رطل)، التي سيكون لها تأثير مكافئ على أداء هياكل الرصف.

تُمثل عوامل مكافئ حمل المحور نسبة عدد تكرارات حمل أي محور وترتيب المحاور (سواء كان أحاديًا أو ترادفيًا أو ثلاثي المحاور) اللازمة للتسبب في حدوث نفس الانخفاض في مؤشر قابلية الخدمة الحالي الذي يتسبب به تطبيق واحد لحمل محور مفرد وزنه (٨,١٦) طن (١٨ ألف رطل). للوصول إلى مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) التصميمية، من الضروري افتراض الرقم الإنشائي (SN) ثم تحديد عوامل مكافئ حمل المحور المدرجة في الجداول من (أ-١) إلى (أ-٩) لقيم قابلية الخدمة النهائية البالغة

٢,٠ و ٢,٥ و ٣,٠. للمحاولة الأولى، سيأتي استخدام الرقم الإنشائي بقيمة ٥,٠ لتحديد عوامل مكافئ حمل المحور المفرد البالغ وزنه (٨,١٦) طن (١٨ ألف رطل)، بنتائج دقيقة بما يكفي لتناسب أغراض التصميم. وفي حال أدى التصميم النهائي إلى تحقق قيمة رقم إنشائي مختلفة كثيرًا، فينبغي إجراء المزيد من المحاولات لتقليص نسبة الخطأ.

إذا كان عدد الأحمال المكافئة للمحور يمثل إجمالي جميع المسارات في الاتجاهين، فيجب توزيع هذا العدد حسب الاتجاه والمسار للأغراض التصميمية. عادة ما يتم التوزيع الاتجاهي عن طريق تخصيص ٥٠ ٪ من المرور لكل اتجاه ما لم تكن هناك اعتبارات خاصة (مثل: تحرك المزيد من الشاحنات المحملة في اتجاه واحد والمزيد من الشاحنات الفارغة في الاتجاه الآخر) تبرر نسب تخصيص أخرى. وفيما يتعلق بالتوزيع على المسارات، طُورت عوامل للتوزيع على المسارات في المرافق متعددة المسارات.

عند حساب مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد لتصميم مشروع معين، من المناسب تحويل التوزيع المروري المقدر إلى عوامل أحمال شاحنات. يوجد طريقتان لحساب عوامل أحمال الشاحنات.

عندما تتوفر معلومات حمل المحور من إحدى محطات الوزن يمكن افتراض أنها تمثل المرور للرصف المراد تصميمه ومن ثم حساب عامل حمل شاحنة مباشرة.

بالنسبة للحالات التصميمية التي يتوقع فيها وفاء الهيكل الإنشائي المبدئي للرصف بالغرض، أثناء فترة التحليل (العمر التصميمي) بدون إعادة تأهيل أو إعادة إنشاء طبقة السطح، فكل ما يلزم حينئذٍ هو إجمالي المرور على طول فترة التحليل. يكون المرور المتوقع -عمومًا- هو عدد مرات التطبيق التراكمية لمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL)، بوزن (٨,١٦) طن (١٨ ألف رطل)، المتوقعة على الطريق، في حين أن المصمم يطلب عدد مرات التطبيق في المسار التصميمي. وبالتالي، يجب على المصمم أن يحول المرور التصميمي الإجمالي للطريق حسب الاتجاه ثم حسب المسار (في حال وجود أكثر من مسارين). يمكن استخدام المعادلة التالية لحساب المرور (w_{18}) في المسار التصميمي.

المعادلة (٥-٤)

$$W_{18} = D_D \times D_L \times w_{18}$$

حيث:

D_D = معامل التوزيع الاتجاهي المُعبّر عنه كنسبة، ويشير إلى توزيع وحدات مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) لكل اتجاه.

D_L = معامل التوزيع على المسارات المعبر عنه كنسبة، ويشير إلى توزيع المرور عند توفر مسارين أو أكثر في الاتجاه الواحد.

w_{18} = الوحدات التراكمية لمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL)، ذي الوزن (٨,١٦) طن (١٨ ألف رطل)، المتوقعة لمقطع مُحدد من الطريق في أثناء فترة التحليل.

على الرغم من أن قيمة العامل (D_D) تعادل بشكل عام ٠,٥ (٥٠٪) لمعظم الطرق، إلا أن هناك حالات يمكن أن يتحرك فيها المزيد من الوزن في اتجاه واحد أكثر من الآخر. وبالتالي، ينبغي تصميم الجانب الذي يحتوي على مركبات أثقل بوحدات ذات أرقام أعلى من مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL). يمكن أن تتراوح قيمة (D_D) من ٠,٣ إلى ٠,٧، حسب الاتجاه "المُحمّل" والاتجاه "غير المُحمّل".

وبالنسبة لمعامل (D_L)، يمكن استخدام الجدول (٥-٦) كدليل.

الجدول (٥–٦) عامل توزيع المرور على مسارات الطريق (AASHTO,1993).

عدد المسارات في الاتجاهين	نسبة المرور من مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل) في مسار التصميم
١	١٠٠
٢	١٠٠ – ٨٠
٣	٨٠ – ٦٠
أكبر من أو يساوي ٤	٧٥ – ٥٠

٥-٢-٥ الموثوقية:

الموثوقية هي وسيلة إدراج قدر ما من الثقة في عملية التصميم للتأكد من بقاء بدائل التصميم المختلفة صامدة طوال فترة التحليل. يعبر عامل تصميم الموثوقية عن الاختلافات العشوائية في تنبؤات المرور ومن ثم يوفر مستويات ضمان محددة سابقًا (R) لتأكيد أن قطاعات الرصف ستبقى صامدة طوال الفترة المصممة لها.

وبصفة عامة، مع تزايد حجم المرور وصعوبة تحويل المرور وحرف مساره وتنامي تطلعات العامة بخصوص توافر الطريق للاستخدام، يجب تقليص مخاطر عدم تلبية الأداء للتطلعات إلى أدنى حد. ويمكن تحقيق ذلك باختيار مستويات أعلى من الموثوقية. ترتبط المستويات الأعلى بالمرافق الأكثر استخداماً، بينما ترتبط المستويات الأقل (٥٠٪) بالطرق المحلية. ويقدم الجدول (٥-٧) مستويات الموثوقية الموصى بها والمتناغمة مع تصنيف الطريق المشروح في الجزء الفرعي (٥-١-١)، والمقرر اعتماد العمل بها في المملكة العربية السعودية. تؤدي المستويات الأعلى من الموثوقية إلى رصف أكثر سماكة.

الجدول (٥–٧) مستويات الموثوقية الموصى بها وفقًا لكل فئة تصنيف.

فئة التصنيف	مستوى الموثوقية الموصى به للطرق	
	الحضرية	الريفية
VL	٦٥	٦٥
L	٦٥	٦٥
M	٩٠	٨٥
H	٩٥	٩٠
VH	٩٥	٩٠
EH	٩٥	٩٠

يُتحكم في موثوقية التصميم من خلال استخدام عامل الثقة (F_R)، الذ يُضرب في المرور المتوقع على امتداد فترة التصميم (w_{18}) للحصول على عدد مرات تطبيق (w_{18}) التصميمية المستخدمة في معادلة التصميم. عند مستوى محدد من الموثوقية (R)، يكون عامل الموثوقية دالة في الانحراف المعياري الكلي (S_o)، الذي يأخذ في الحسبان كل من الاختلاف العشوائي في المرور والاختلاف الطبيعي في أداء الرصف المتوقع عند قيمة (w_{18}) محددة. تتراوح قيم (S_o) للرصف المرن بين (٠,٤٠ - ٠,٥٠). للحالة التي يؤخذ فيها بالاعتبار التباين في المرور المستقبلي المتوقع (إلى جانب التباينات الأخرى المرتبطة بنماذج الأداء المعدلة للرصف) فإن الانحراف المعياري الكلي للرصف المرن يبلغ ٠,٤٩، بينما في الحالة التي لا يؤخذ فيها التباين في المرور المستقبلي المتوقع بالاعتبار تبلغ القيمة المقدرة للانحراف المعياري الكلي ٠,٤٤.

٥-٢-٦ خواص المواد:

كما هو موضح في الشكل (٥-١)، يتألف الرصف المرن عادة من قاعدة ترابية مجهزة تحمل فوقها طبقة ما تحت الأساس وطبقة الأساس والطبقة السطحية. وفي بعض الحالات، تُثّبت طبقة ما تحت الأساس و/أو طبقة الأساس لتعظيم استخدام المواد المحلية.

٥-٢-٦-١ القاعدة الترابية:

القاعدة الترابية المجهزة هي طبقة مكونة من تربة قاعدة الطريق المدموكة، أو مادة منقولة أخرى جرى دمكها لتصل إلى مستوى كثافة مُحدد. معامل المرونة (M_R) هو خاصية المواد المحددة المستخدمة لوصف القاعدة الترابية لتصميم الرصف. تعطي المواصفة (AASHTO T307) الطريقة المتبعة لتحديد قيمة (M_R). وإذا لم يكن إجراء اختبار معامل المرونة ممكنًا، فيمكن استخدام عوامل مناسبة لتقدير قيمة (M_R) من نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR).

نشر الباحثان هيوكيلوم وكلومب (Heukelom و Klomp) علاقات الارتباط بين قيمة نسبة تحمل كاليفورنيا لسلاح المهندسين (الأمريكي)، باستخدام الدمك الديناميكي، ومعامل التربة في مكانها. وتعبر المعادلة التالية عن علاقة الارتباط:

$$M_R = 1500 \times CBR\ (psi)$$ **المعادلة (٥-٥)**

انتشر استخدام هذه العلاقة بين جهات التصميم والباحثين، وتعد منطقية ومناسبة لأنواع التربة الناعمة والتي تكون نسبة تحمل كاليفورنيا لها وهي مغمورة بالماء تساوي (١٠٪) أو أقل. وينبغي أن تتوافق نسبة تحمل كاليفورنيا مع الكثافة الحقلية المتوقعة. في حالة أنواع التربة التي تزيد نسبة تحمل كاليفورنيا الخاصة بها عن (١٠٪)، يمكن استخدام المعادلة التالية:

$$M_R = 2555 \times CBR^{0.64}\ (psi)$$ **المعادلة (٥-٦)**

ينبغي إجراء اختبارات معملية لمعامل المرونة (أو قيم معامل المرونة المحسوبة بعلاقات الارتباط) على عينات ممثلة لظروف الإجهاد والرطوبة التي تحاكي الفصول الرطبة الأساسية. والهدف من تحديد المعاملات الموسمية هو تحديد مقدار التلفيات النسبية الذي سيتعرض له الرصف خلال كل موسم من مواسم السنة، والتعامل معها على أنها جزء لا يتجزأ من التصميم الشامل. ثم بعد ذلك يُحسب معامل المرونة الفعال للقاعدة الترابية، والذي يكافئ الآثار المجمعة لكل قيم المعاملات الموسمية.

وتكون ظروف الرطوبة الموسمية ينبغي استخدامها لاختبار عينات القاعدة الترابية هي تلك التي تحقق نتائج مُختلفة كثيرًا عن معامل المرونة. يُعرض فيما يلي نوعان مختلفان من الطرق المتبعة لتحديد التفاوت الموسمي للمعاملات بوصفها أدلة استرشادية. إحدى الطريقتين هي إيجاد العلاقة المعملية بين معامل المرونة ومحتوى الرطوبة. ثم بعد ذلك، وبعد تحديد محتوى الرطوبة في التربة أسفل الرصف بالموقع، تُقدر قيمة معامل المرونة لكل موسم. والطريقة البديلة هي الحساب التراجعي لمعامل المرونة لمختلف الفصول باستخدام الانحرافات المُقاسة في الرصفيات التي في الخدمة. وهذه يمكن استخدامها كعوامل تعديل لتصحيح معامل المرونة لظروف مرجعية معينة.

إلى جانب تحديد المعامل الوسمي، فمن الضروري -أيضًا- تقسيم السنة إلى فترات زمنية مختلفة يكون المعاملات المختلفة فيها فعالة. كما يجب ترجمة البيانات الموسمية إلى معامل فعال لمرونة القاعدة الترابية بمساعدة المخطط الموضح في الشكل (٥-٢).

وفيما يلي عرض لخطوات تلك العملية:

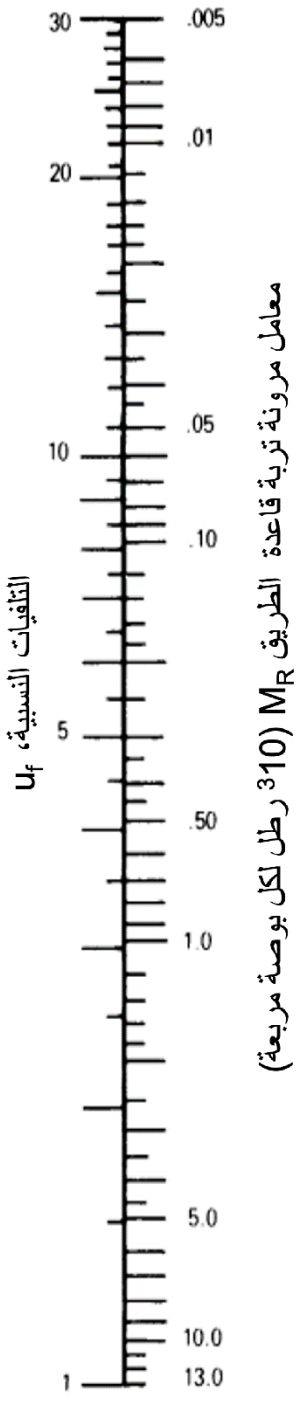
- أدخل قيم المعاملات الموسمية في الفترات الزمنية المقابلة لها. إذا امتد أقصر موسم لنصف شهر، فيجب تحديد جميع الفصول على أساس فترة نصف شهر، ويجب ملء جميع المربعات. إذا امتد أقصر موسم لمدة شهر، فيجب تحديد جميع الفصول على أساس فترة شهر واحد، ويُملأ مربع واحد فقط لكل شهر.
- قدّر قيم التلفيات النسبية (u_f) المقابلة لكل معامل موسمي. ويُنفّذ ذلك باستخدام المقياس الرأسي أو المعادلة التالية:

$$u_f = 1.18 \times 10^8 \times M_R^{-2.32}$$ **المعادلة (٥-٧)**

- ينبغي إضافة قيم (u_f) إلى بعضها، ثم قسمتها على عدد المضاعفات الموسمية (١٢ أو ٢٤) لتحديد متوسط التلفيات النسبية. ويكون معامل المرونة الفعال للقاعدة الترابية (M_R)، حينئذ، هو القيمة المناظرة لمتوسط التلفيات النسبية على مقياس (M_R- u_f).
- ينبغي ألا تُستخدم قيمة (M_R) الفعالة تلك إلا في تصميم الرصفيات المرنة في ضوء معايير قابلية الخدمة.

يعرض الشكل (ب-١) في الملحق (ب) مثالا على تقدير معامل المرونة الفعال للقاعدة الترابية للرصفيات المرنة.

الشهر	معامل مرونة تربة قاعدة الطريق M_R (رطل لكل بوصة مربعة)	التلفيات النسبية، u_f
يناير		
فبراير		
مارس		
أبريل		
مايو		
يونيو		
يوليو		
أغسطس		
سبتمبر		
أكتوبر		
نوفمبر		
ديسمبر		
	الإجمالي: Σu_f =	



متوسط: $\overline{u_f} = \frac{\Sigma u_f}{n} =$ _____

معامل مرونة تربة قاعدة الطريق M_R(رطل لكل بوصة مربعة) = _____ (متوافق مع $\overline{u_f}$)

الشكل (٥–٢) مخطط تقدير المعامل الفعال لمرونة القاعدة الترابية للرصفيات المرنة (AASHTO, 1993).

٥-٢-٦-٢ طبقة ما تحت الأساس

طبقة ما تحت الأساس هي جزء الهيكل الإنشائي للرصف المرن الذي يقع بين القاعدة الترابية وطبقة الأساس. تتألف عادة من طبقة مدموكة من مادة حبيبية، إما معالجة وإما غير معالجة، أو من طبقة من التربة المعالجة بمضافات مناسبة. وبالإضافة إلى موقعها في طبقات الرصف، تُميز عادة عن مادة طبقة قاعدة الأساس بمواصفات أقل لكل من القوة، واللدونة والتدرج. وينبغي أن تكون مادة طبقة ما تحت الأساس من جودة أفضل كثيرًا من القاعدة الترابية. ويمكن التغاضي أحيانًا، ولأسباب اقتصادية، عن وجود طبقة ما تحت الأساس، إذا كانت القاعدة الترابية عالية الجودة. وينبغي دمك طبقة ما تحت الأساس الركامية غير المعالجة بنسبة ٩٥٪ من أقصى كثافة معملية، أو أعلى من ذلك، في ضوء ما تنص عليه مواصفات (AASHTO T180)، الطريقة (D)، أو ما يكافئها. تُعطي مواصفة (AASHTO T307) الطريقة المتبعة لتحديد معامل المرونة (E_{SB}).

من أجل استخدامه في طريقة التصميم هذه، ينبغي تمثيل مادة ما تحت الأساس بمعامل الطبقة (a_3) ليمكن تحويل سمكها الفعلي إلى رقم إنشائي.

٥-٢-٦-٣ طبقة الأساس

طبقة الأساس هي جزء الهيكل الإنشائي للرصف الذي يقع مباشرة أسفل الطبقة السطحية. ووظيفتها الرئيسة هي الدعم الإنشائي للرصف. وتتألف عادة من الركام، مثل ركام الصخور المكسرة أو الخبث المكسر أو الحصى المكسر أو الرمل، أو خليط من تلك المواد. ومن الممكن استخدامها بدون معالجتها أو بعد معالجتها بمضافات تثبيت مناسبة، مثل الأسمنت البورتلاندي أو الأسفلت أو الجير أو الرماد الأسمنتي المتطاير أو الرماد الجيري المتطاير، أي أساسات بوزولانية مستقرة. وتتميّز المواصفات العامة لمواد طبقة الأساس بكونها أشد صرامة من متطلبات مواد طبقة ما تحت الأساس من حيث القوة واللدونة والتدرج.

تعطي المواصفة (AASHTO T307) الطريقة المتبعة لتحديد معامل المرونة (E_{BS}). وينبغي دمك طبقة الأساس الركامية غير المعالجة حتى ٩٥٪ من أقصى كثافة معملية، أو أعلى من ذلك، في ضوء ما تنص عليه المواصفة (AASHTO T180)، الطريقة (D)، أو ما يكافئها.

من أجل استخدامه في طريقة التصميم هذه، يجب تمثيل مادة الأساس بمعامل الطبقة (a_2) ليمكن تحويل سمكها الفعلي إلى رقم إنشائي.

٥-٢-٦-٤ الطبقة السطحية

تتألف طبقة السطح في الهيكل الإنشائي للرصف المرن من خلطة ركام معدني ومواد أسفلتية، موضوعة في الطبقة العلوية، وتُنشأ عادة فوق طبقة الأساس. وإلى جانب وظيفتها الرئيسة باعتبارها جزء إنشائي من الرصف، ينبغي تصميمها بما يضمن مقاومة تأثيرات قوى البري للمرور، والحد من كمية المياه السطحية المتغلغلة في الرصف، وتوفير سطح مقاوم للانزلاق، وتوفير سطح ناعم ومنتظم للسير.

يعتمد نجاح الطبقة السطحية، إلى حد ما، على الحصول على خلطة لها نسب مثالية لتدرج الركام وأن تكون المادة الرابطة للأسفلت متينة لمقاومة التشقق والتطاير، دون أن تصبح غير مستقرة في ظل الظروف المرورية والمناخية المتوقعة. يشكل استخدام طريقة تصميم معملية ركنًا أساسيًا لضمان الحصول على خلطة مُرضية.

ولتحديد معامل مرونة الخرسانة الأسفلتية (E_{AC})، يمكن استخدام اختبار الشد غير المباشر متكرر الحمل (ASTM D7369). من أجل استخدامه في إجراء التصميم هذا، يجب تمثيل مادة خلطة الأسفلت بمعامل الطبقة (a_1) ليتسنى تحويل سمكها الفعلي إلى رقم إنشائي. وليكون استخدام طريقة التصميم هذه ممكنة، يجب التعبير عن مادة خلطة الأسفلت بقيمة معامل الطبقة (a_1) ليمكن تحويل سمكها الفعلي إلى رقم إنشائي.

٥-٢-٦-٥ معاملات الطبقة

يجب معرفة معاملات الطبقة الإنشائية (a_i) لأغراض التصميم الإنشائي للرصف المرن. تُعيّن قيمة هذا المعامل لكل مادة من مواد الطبقة الإنشائية للرصف لتحويل قيم سُمك الطبقة الفعلية إلى رقم إنشائي (SN). يعبر معامل الطبقة هذا عن العلاقة التجريبية بين الرقم الإنشائي (SN) والسُمك وهو مقياس للقدرة النسبية للمادة على العمل كمكون إنشائي للرصف. تعكس المعادلة العامة التالية للرقم الإنشائي التأثير النسبي لمعاملات الطبقة (a_i) والسُمك (D_i):

$$SN = \sum_{i=1} a_i \times D_i$$ **المعادلة (٥-٨)**

على الرغم من اعتماد المعامل المرن كمقياس قياسي لجودة المادة، فلا يزال من الضروري تحديد معاملات الطبقة المناظرة بسبب معالجتها في نهج تصميم الرقم الإنشائي. تُقسّم طريقة تقدير هذه المعاملات إلى خمس فئات، اعتمادًا على نوع ووظيفة مادة الطبقة، وهي الخرسانة الأسفلتية، والأساس الحبيبي، وما تحت الأساس الحبيبي، وقاعدة الأس، والأساس المعالج بالأسمنت والأساس الأسفلتي.

٥-٢-٦-٥-١ طبقة الخرسانة الأسفلتية

يعرض الشكل (٥-٣) مخططًا يمكن استخدامه لتقدير معامل الطبقة الإنشائية لطبقة خرسانة أسفلتية سطحية متدرجة بكثافة بناءً على معاملها المرن (E_{AC}) عند ٢٥ درجة مئوية (٦٨ درجة فهرنهايت). يوصى بتوخي الحذر لقيم معامل أعلى من ٣,١٠٠ ميجا باسكال

(٤٥٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة). على الرغم من أن الخرسانة الأسفلتية ذات المعامل الأعلى تكون أكثر صلابة ومقاومة للانثناء، إلا أنها أكثر عرضة للتشقق بسبب الكلل والحرارة.

٥-٢-٦-٥-٢ طبقات الأساس الحبيبية

يعرض الشكل (٥-٤) مخططًا يمكن استخدامه لتقدير معامل الطبقة الإنشائية (a_2) من نتيجة واحدة من أربع نتائج اختبار معملي مختلفة على مادة أساس حبيبي. يوصى باستخدام معامل مرونة الأساس (E_{BS}) (مقياس المعامل في الشكل).

يمكن استخدام المعادلة (٥-٩) بدلاً من الشكل (٥-٤) لتقدير معامل الطبقة (a_2) لمادة الأساس الحبيبي من معاملها المرن (E_{BS}).

المعادلة (٥-٩) $$\mathbf{A_2 = 0.246 \times logE_{BS} - 0.977}$$

بالنسبة لطبقات الأساس الركامية، يكون (E_{BS}) دالة في حالة معدل الإجهاد (θ) داخل الطبقة ويُعبّر عنه عادةً بالمعادلة (٥-١٠):

المعادلة (٥-١٠) $$\boldsymbol{E_{BS} = k_1 \times \theta \times k_2}$$

حيث:

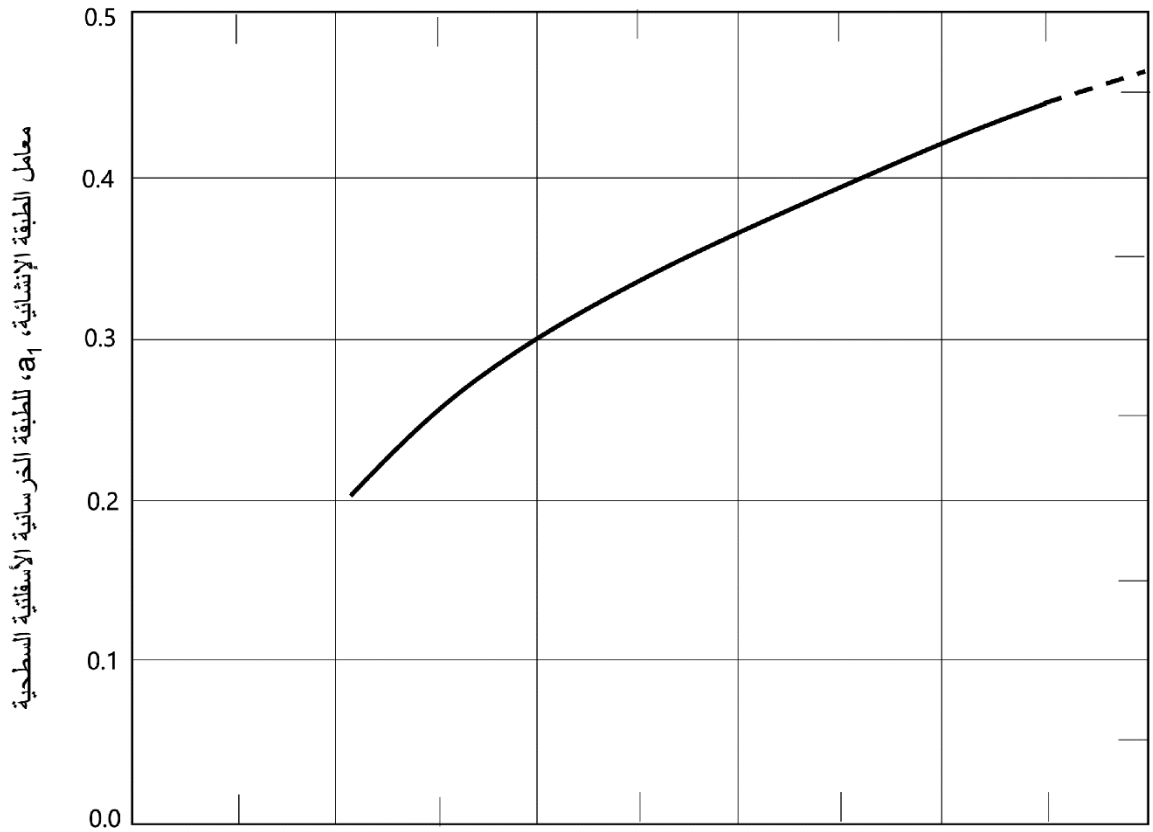
θ = حالة الإجهاد أو مجموع الإجهادات الرئيسة ($\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$) (رطل لكل بوصة مربعة).

k_1, k_2 = ثوابت الانحدار التي هي دالة في نوع المادة. القيم النموذجية لمواد الأساس هي: k_1 = (٣,٠٠٠ – ٨,٠٠٠)، k_2 = (٠,٥ - ٠,٧).

تختلف قيم حالة الإجهاد داخل طبقة الأساس باختلاف معامل القاعدة الترابية وسمك الطبقة السطحية. القيم النموذجية للاستخدام في التصميم موضحة في الجدول (٥-٨).

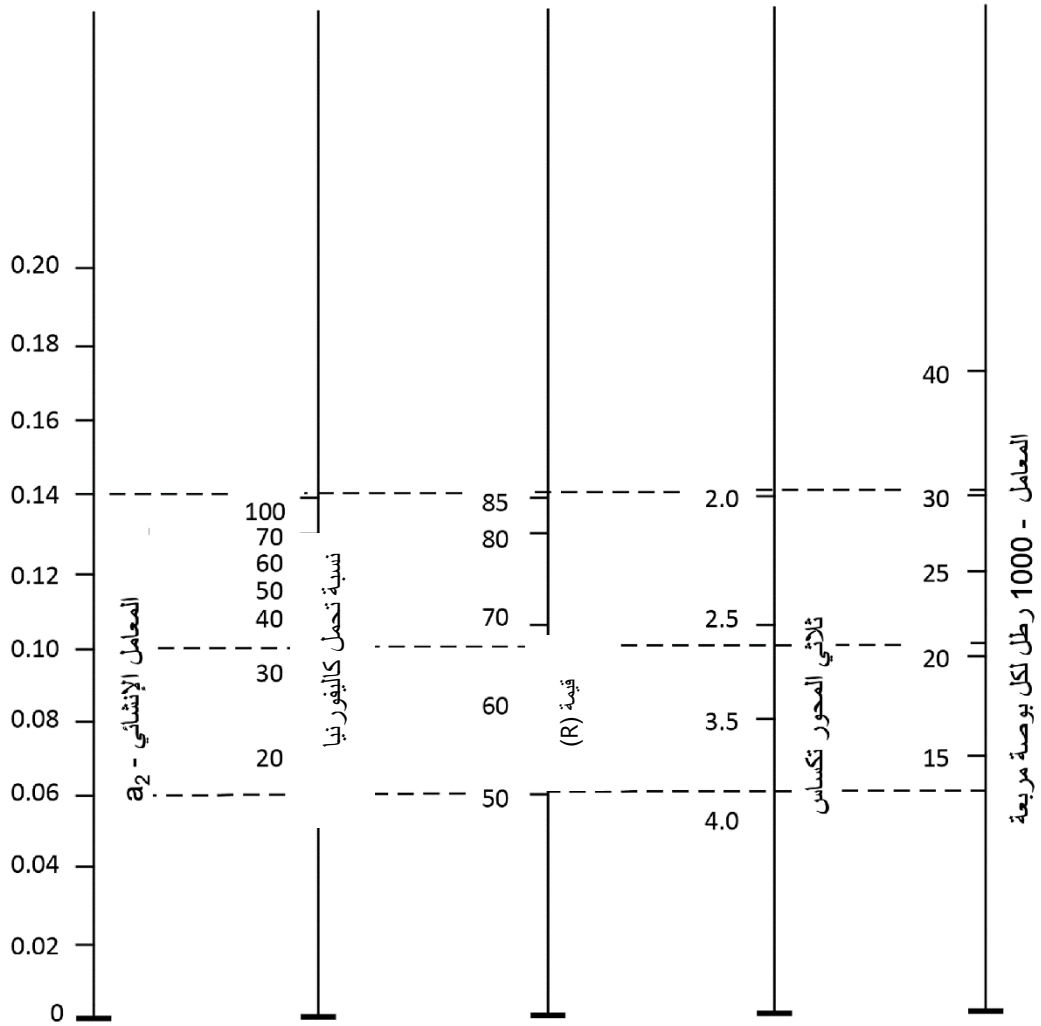
الجدول (٥–٨) القيم النموذجية لحالة الإجهاد (θ) لطبقة أساس ركامية (AASHTO, 1993).

سمك الخرسانة الأسفلتية	معامل مرونة القاعدة الترابية		
	٢٠,٧ ميجا باسكال (٣,٠٠٠ رطل لكل بوصة)	**٥١,٧ ميجا باسكال (٧,٥٠٠ رطل لكل بوصة)**	**١٠٣,٤ ميجا باسكال (١٥,٠٠٠ رطل لكل بوصة)**
أقل من ٥٠ مم (أقل من ٢ بوصة)	٠,١٤ ميجا باسكال (٢٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,١٧ ميجا باسكال (٢٥ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,٢٠ ميجا باسكال (٣٠ رطل/بوصة مربعة)
٥٠ - ١٠٠ مم (٢ - ٤ بوصة)	٠,٠٧ ميجا باسكال (١٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,١٠ ميجا باسكال (١٥ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,١٤ ميجا باسكال (٢٠ رطل لكل بوصة مربعة)
١٠٠ - ١٥٠ مم (٤ - ٦ بوصة)	٠,٠٣٥ ميجا باسكال (٥ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,٠٧ ميجا باسكال (١٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,١٠ ميجا باسكال (١٥ رطل لكل بوصة مربعة)
أكبر من ١٥٠ مم (أكبر من ٦ بوصة)	٠,٠٣٥ ميجا باسكال (٥ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,٠٣٥ ميجا باسكال (٥ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,٠٣٥ ميجا باسكال (٥ رطل لكل بوصة مربعة)



معامل المرونة E_{AC} (رطل لكل بوصة) لطبقة أسفلتية عند ٢٠ درجة مئوية
(٦٨ درجة فهرنهايت)

الشكل (٥–٣) مخطط تقدير معامل الطبقة الإنشائية لخرسانة أسفلتية كثيفة التدرج بناء على معامل المرونة (AASHTO, 1993).



الشكل (٥–٤) تفاوت معامل طبقة الأساس الحبيبية (a2) مع مختلف معلمات قوة الأساس (AASHTO, 1993).

٥-٢-٦-٥-٣ طبقات ما تحت الأساس الحبيبية

يعرض الشكل (٥-٥) مخططًا يمكن استخدامه لتقدير معامل الطبقة الإنشائية (a_3) من نتيجة واحدة من أربع نتائج معملية مختلفة على مادة طبقة ما تحت الأساس الحبيبية. يوصى باستخدام معامل مرونة طبقة ما تحت الأساس (E_{SB}) (مقياس المعامل في الشكل).

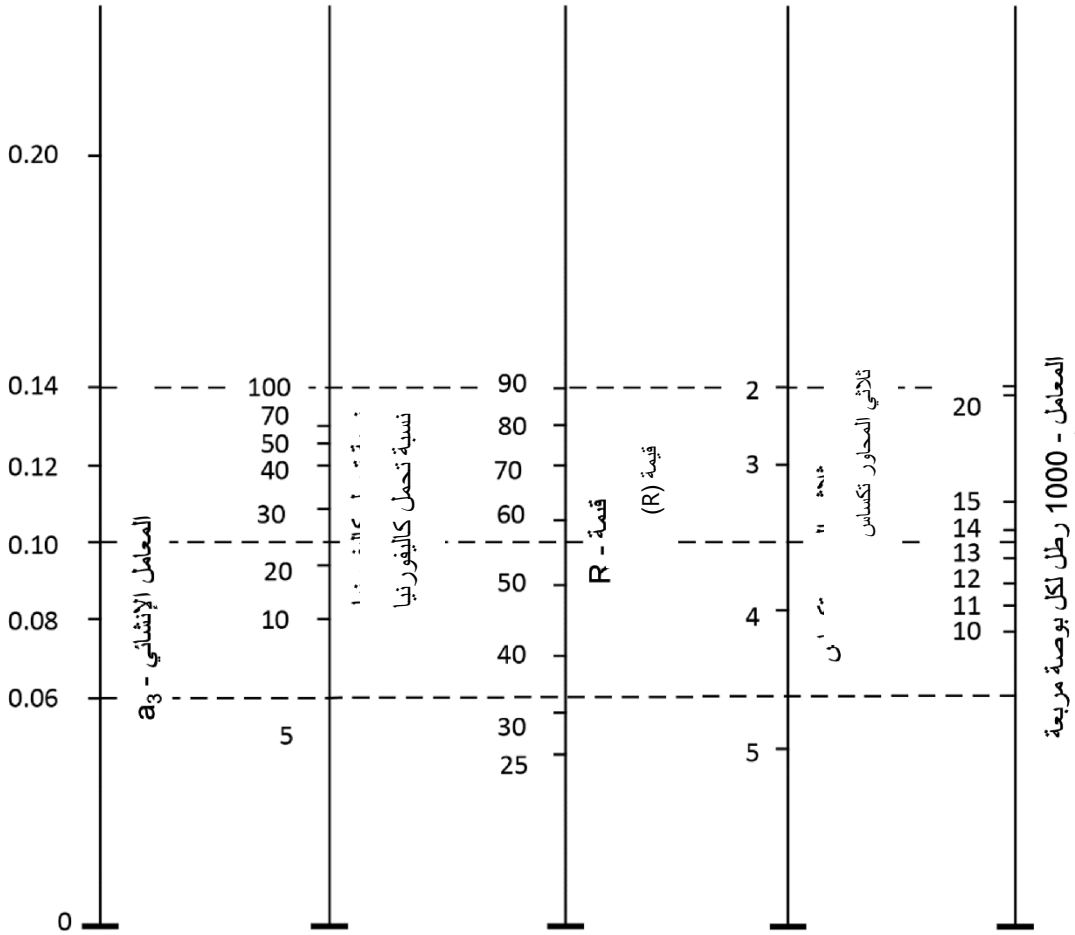
تبين المعادلة (٥-١١) العلاقة بين (E_{SB}) و (a_3):

$$a_3 = 0.227 \times logE_{SB} - 0.839$$ **المعادلة (٥-١١)**

بالنسبة لطبقات ما تحت الأساس الركامية، يتأثر معامل المرونة (E_{SB}) بحالة الإجهاد (θ) بطريقة مماثلة لتلك الخاصة بطبقة الأساس. تتراوح القيم النموذجية لـ (k_1) بين (١,٥٠٠ – ٦,٠٠٠)، في حين تتراوح قيم (k_2) بين (٠,٤ – ٠,٦). تُعرض حالات الإجهاد (θ) التي يمكن استخدامها كدليل لاختيار قيمة المعامل لسُمك طبقة ما تحت الأساس الذي يتراوح بين ١٥٠ و ٣٠٠ مم (٦ - ١٢ بوصة) في الجدول (٥-٩).

الجدول (٥–٩) القيم النموذجية لحالة الإجهاد (θ) لطبقة ما تحت الأساس (AASHTO, 1993).

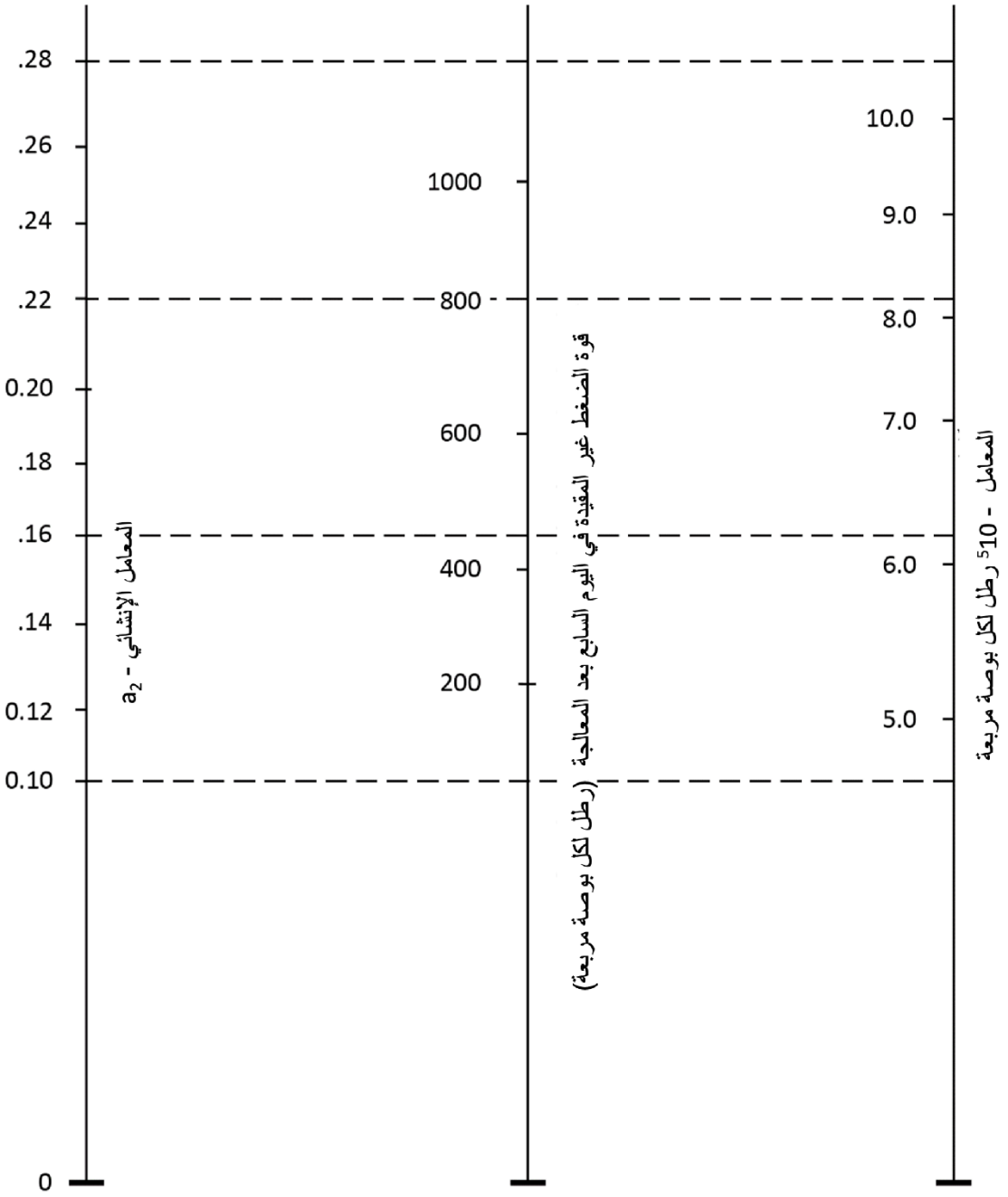
سمك الخرسانة الأسفلتية	حالة الإجهاد (θ)
أقل من ٥٠ مم (أقل من ٢ بوصة)	٠,٠٧ ميجا باسكال (١٠,٠ رطل لكل بوصة مربعة)
٥٠ – ١٠٠ مم (٢ – ٤ بوصة)	٠,٠٥ ميجا باسكال (٧,٥ رطل لكل بوصة مربعة)
أكبر من ١٠٠ مم (أكبر من ٤ بوصة)	٠,٠٣٥ ميجا باسكال (٥,٠ رطل لكل بوصة مربعة)



الشكل (٥–٥) تفاوت معامل طبقة ما تحت الأساس الحبيبية (a3) مع مختلف معلمات قوة ما تحت الأساس (AASHTO, 1993).

٥-٢-٦-٥-٤ طبقات الأساس المعالجة بالأسمنت

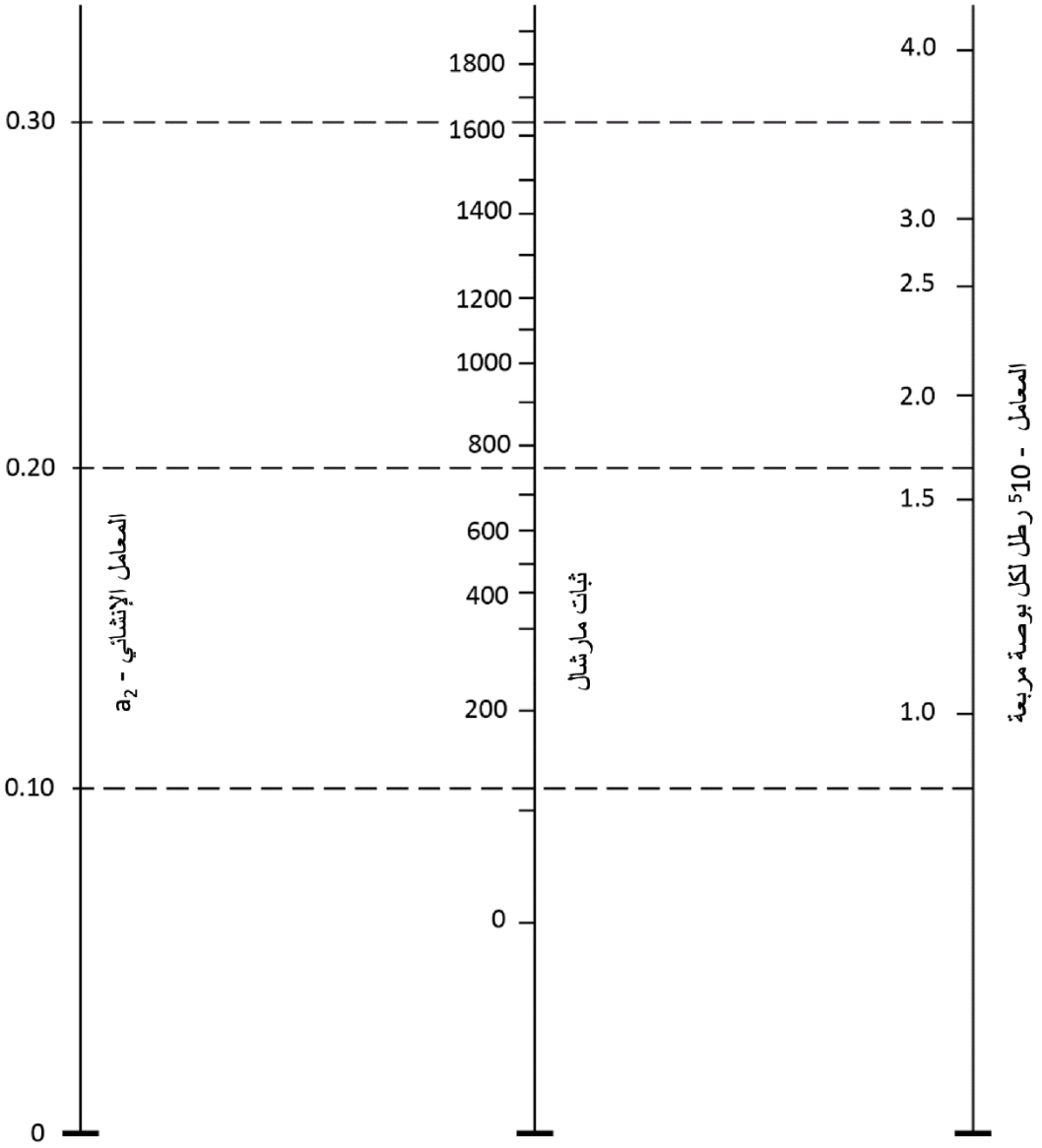
يعرض الشكل (٥-٦) مخططًا يمكن استخدامه لتقدير معامل الطبقة الإنشائية (a_2) لمادة أساس معالجة بالأسمنت إما من معامل مرونتها (E_{BS}) أو على نحوٍ بديل قوة الضغط غير المقيدة في اليوم السابع بعد المعالجة وفقًا للمواصفة (ASTM D1633). يوصى باستخدام مقياس المعامل.



الشكل ٥–٦ تفاوت المعامل (a2) لطبقات الأساس المعالجة بالأسمنت مع مختلف معلمات قوة الأساس (AASHTO, 1993).

٥-٢-٦-٥-٥ طبقات الأساس المعالجة بالأسفلت

يعرض الشكل (٥-٧) مخططًا يمكن استخدامه لتقدير المعامل الإنشائي (a_2) لمادة طبقة أساس معالجة بالأسفلت إما من معامل مرونتها (E_{BS}) أو على نحوٍ بديل عن طريق ثبات مارشال وفقًا للمواصفة (AASHTO T245) و/ أو المواصفة (ASTM D5581). ويوصى باستخدام مقياس المعامل.



الشكل (٥–٧) تفاوت المعامل (a2) لطبقات الأساس المعالجة بالأسفلت مع مختلف معلمات قوة الأساس (AASHTO, 1993).

٥-٢-٧ صرف المياه:

تكون معالجة مستوى الصرف المتوقع للرصف المرن من خلال استخدام معاملات الطبقة المعدلة. يُشار إلى عامل تعديل معامل الطبقة بقيمة (m_i) وقد دُمجت في معادلة الرقم الإنشائي (SN) مع معامل الطبقة (a_i) والسُمك (D_i) (المعادلة ٥-٣).

يعرض الجدول (٥-١٠) التعريفات العامة المقابلة لمستويات الصرف المختلفة من هيكل الرصف. الجدول (٥-١١) يعرض قيم (m_i) الموصى بها كدالة في جودة الصرف ونسبة الوقت خلال السنة الذي عادة ما يتعرض فيه هيكل الرصف لمستويات الرطوبة التي تقترب من التشبع. ومن الواضح أن نسبة الوقت تعتمد على متوسط هطول الأمطار السنوي وظروف الصرف السائدة.

الجدول (٥–١٠) مستويات الصرف (AASHTO, 1993).

جودة الصرف	إزالة الماء خلال
ممتاز	ساعتان
جيد	يوم واحد
مقبول	أسبوع واحد
ضعيف	شهر واحد
ضعيف للغاية	(الماء لا يُصرّف)

الجدول (٥–١١) قيم (mi) الموصى بها لتعديل معاملات الطبقة الإنشائية لمواد الأساس وما تحت الأساس غير المعالجة في الرصف المرن (AASHTO, 1993).

جودة الصرف	نسبة الوقت الذي يتعرض فيه هيكل الرصف لمستويات الرطوبة التي تقترب من التشبع			
	أقل من ١٪	١ - ٥ ٪	٥ - ٢٥ ٪	أكبر من ٢٥٪
ممتاز	١,٣٥ - ١,٤٠	١,٣٠ - ١,٣٥	١,٢٠ - ١,٣٠	١,٢٠
جيد	١,٢٥ - ١,٣٥	١,١٥ - ١,٢٥	١,٠٠ - ١,١٥	١,٠٠
مقبول	١,١٥ - ١,٢٥	١,٠٥ - ١,١٥	٠,٨٠ - ١,٠٠	٠,٨٠
ضعيف	١,٠٥ - ١,١٥	٠,٨٠ - ١,٠٥	٠,٦٠ - ٠,٨٠	٠,٦٠
ضعيف للغاية	٠,٩٥ - ١,٠٥	٠,٧٥ - ٠,٩٥	٠,٤٠ - ٠,٧٥	٠,٤٠
ملحوظة: تنطبق هذه القيم فقط على تأثيرات الصرف على طبقات الأساس وطبقات ما تحت الأساس غير المعالجة. على الرغم من أن الصرف المُحسن مفيد بالتأكيد للمواد المُثبّتة أو المعالجة، إلا أن التأثيرات على أداء الرصفيات المرنة ليست بالغة كتلك المحددة كمياً في هذا الجدول.				

٥-٢-٨ طريقة التصميم الإنشائي:

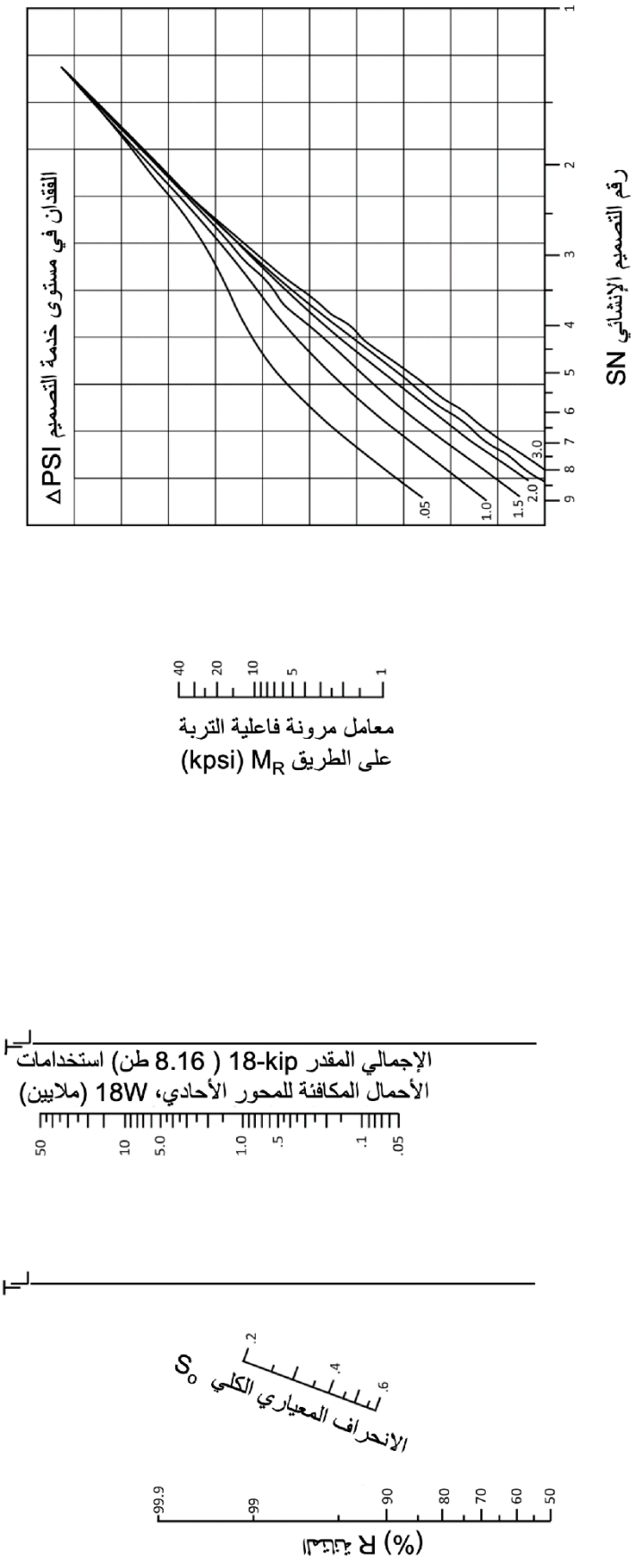
التصميم مبني على تحديد رقم إنشائي للرصف المرن (SN) لتحمل المستوى المتوقع للأحمال المحورية المرورية، ويعرض الشكل (٥-٨) الرسم البياني (مونوغراف، nomograph) الموصى به لتحديد الرقم الإنشائي للتصميم (SN) المطلوب لظروف محددة، بما في ذلك:

- المرور المستقبلي المقدر (w_{18}) لفترة الأداء.
- الموثوقية (R).
- الانحراف المعياري الكلي (S_o).
- المعامل الفعال المرن للقاعدة الترابية (M_R).
- فاقد مستوى قابلية الخدمة التصميمي، ΔPSI ($\Delta PSI = p_i - p_t$).

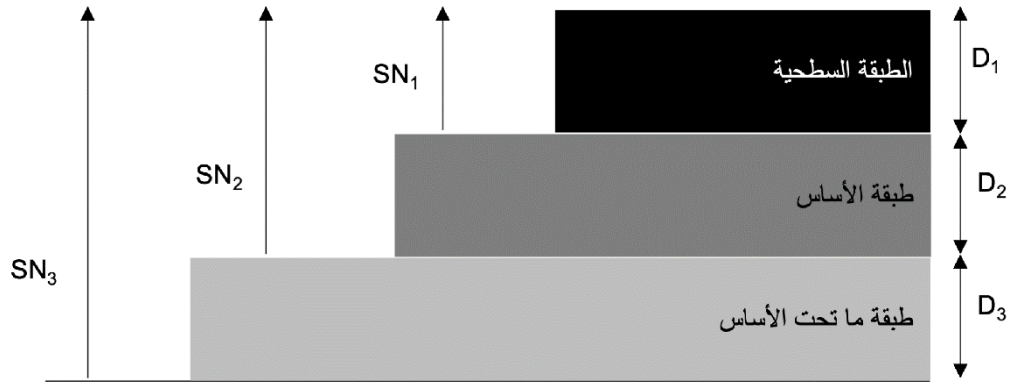
بمجرد تحديد الرقم الإنشائي للتصميم (SN) للهيكل الإنشائي للرصف الأولي، من الضروري تحديد مجموعة قيم لسُمك طبقة الرصف التي، عند جمعها، تعطي قدرة تحمل الأحمال المقابلة للرقم الإنشائي للتصميم (SN). بالنسبة للرصفيات المرنة، يكون الهيكل عبارة عن نظام طبقات وينبغي تصميمه وفقًا لذلك (نهج التحليل الطبقي). ينبغي تصميم الهيكل وفقًا للمبادئ الموضحة في الشكل (٥-٩). أولاً، ينبغي حساب الرقم الإنشائي المطلوب فوق القاعدة الترابية. بنفس الطريقة، ينبغي -أيضًا- حساب الرقم الإنشائي المطلوب فوق كل من طبقة ما تحت الأساس وطبقة الأساس، باستخدام قيمة القوة القابلة للتطبيق لكل منها. يمكن حساب أقصى سمك مسموح به لأي طبقة معينة من خلال العمل مع الفروقات في الأرقام الإنشائية المحسوبة المطلوبة على كل طبقة. على سبيل المثال، سيكون الحد الأقصى للرقم الإنشائي المسموح به لمادة ما تحت الأساس مساويًا للرقم الإنشائي المطلوب فوق طبقة ما تحت الأساس مطروحًا من الرقم الإنشائي المطلوب فوق القاعدة الترابية. بطريقة مماثلة، يمكن حساب الأرقام الإنشائية للطبقات المعنية.

يمكن تلخيص الطريقة في الخطوات التالية:

١- اختر مستوى المتانة (٪) (الجدول ٥-٧).
٢- اختر الانحراف المعياري الكلي (S_o) (الجزء الفرعي ٥-٢-٥)
٣- احسب مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) للمسار التصميمي باتباع الخطوات التالية:
أ- افترض قيمة (SN_i) الأولية لهيكل للرصف لحساب مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) (المعادلة ٥-٤).
ب- احسب (SN_i') من الشكل (٥-٨).
ج- إذا لم تتطابق قيمة (SN_i)، فعندئذٍ يجب تكرار العملية باستخدام رقم إنشائي جديد ($SN = (SNi-SNi')/2$).
د- أعد حساب مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs). كرر العملية السابقة إلى أن يتطابق الرقم الإنشائي المفترض (SN_i) مع الرقم الإنشائي المحسوب (SN_i').
ه- احسب مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs).
٤- حدد فاقد مستوى قابلية الخدمة التصميمي، ΔPSI (المعادلة ٥-١).
٥- حدد الرقم الإنشائي SN_1، SN_2، و SN_3 (الشكل ٥-٨).
٦- حدد معاملات الطبقة a_1، a_2، و a_3 (لشكل ٥-٣، والشكل ٥-٤، والشكل ٥-٥).
٧- حدد عوامل معاملات الصرف (الجدول ٥-١٠ والجدول ٥-١١).
٨- حدد سمك الطبقة (المعادلات ٥-١٢ إلى ٥-١٧).
٩- تحقق من استيفاء الحد الأدنى من متطلبات السمك (الجدول ٥-١٢).
١٠- حدد القطاع العرضي النهائي للرصف.



الشكل (٥–٨) مخطط تصميمي للرصف المرن (AASHTO, 1993).



الشكل (٥–٩) طريقة تحديد سُمك الطبقات باستخدام نهج التحليل الطبقي وفقًا لطريقة (AASHT0) التجريبية.

يمكن بعد ذلك تحديد سُمك الطبقات المقابلة وفقًا للمعادلات التالية:

المعادلة (٥-١٢)

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

المعادلة (٥-١٣)

$$SN_1^* = a_1 \times D_1^* \geq SN_1$$

المعادلة (٥-١٤)

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 \times m_2}$$

المعادلة (٥-١٥)

$$SN_2^* = a_2 \times m_2 \times D_2^*$$

المعادلة (٥-١٦)

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

المعادلة (٥-١٧)

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 \times m_3}$$

لاحظ أن a، D، m، و SN كما هي مُعرفة أعلاه وهي القيم الدنيا المطلوبة. تشير علامة النجمة المصاحبة للرمز D أو SN إلى أنها تمثل القيمة المستخدمة بالفعل، والتي يجب أن تكون مساوية للقيمة المطلوبة أو أكبر منها. ينبغي تقريب سمك طبقات الرصفيات المرنة إلى أقرب نصف بوصة. يُعطى الحد الأدنى من السماكات العملية لكل طبقة رصف في الجدول (٥-١٢).

الجدول (٥–١٢) الحد الأدنى للسمك (AASHTO, 1993).

المرور، مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESALs) (مليون)	خرسانة أسفلتية		طبقة أساس ركامية	
	مم	بوصة	مم	بوصة
أكبر من ٠,٠٥	25 [1]	1 [1]	١٠٠	٤
٠,٠٥ - ٠,١٥	50	2	١٠٠	٤
٠,١٥ - ٠,٥	64	2 ½	١٠٠	٤
٠,٥ - ٢	75	3	١٥٠	٦
٢ - ٧	89	3 ½	١٥٠	٦
أكبر من ٧	100	4	١٥٠	٦
١- أو المعالجة السطحية				

يحتوي الملحق (ج) على مثال للتصميم الإنشائي للرصف المرن بطريقة (AASHT0) التجريبية.

٥-٣ الطريقة الميكانيكية-التجريبية لتصميم الرصف:

٥-٣-١ المبادئ الأساسية:

طريقة التصميم/التحليل تحسب استجابات الرصف (الإجهادات والانفعالات والانحرافات) وتستخدم تلك الاستجابات لحساب التلفيات التزايدية بمرور الوقت. وتربط الطريقة -تجريبيًا- التلفيات التراكمية مع عيوب الرصف المشاهدة. ويوضح المخطط الانسيابي في الشكل (٥-١٠) هذه الطريقة الميكانيكية-التجريبية.

تُستخدم العملية الأساسية التالية المكونة من ثلاث خطوات:

١- استحدث تصميم تجريبي للمشروع.
٢- توقع العيوب الرئيسة والنعومة من أجل تصميم التجربة.
٣- راجع الأداء المتوقع للتصميم التجريبي مقابل معايير الأداء، ثم عدل التصميم التجريبي حسب الحاجة من أجل إنتاج تصميم مجدي يفي بمعايير الأداء عند مستوى الموثوقية المحدد.

تُجمع استجابات الرصف (الإجهادات والانفعالات والانحرافات) مع المعلمات الأخرى لكل من الرصف والمرور والمناخ والمواد؛ للتنبؤ بتطور عيوب الرصف الرئيسة وفقدان نعومة الرصف بمرور الوقت. وتمثل هذه المخرجات الأساس للتحقق من كفاية التصميم التجريبي. كما أن للطريقة عملية أو سمة آلية تتكرر حتى الحصول على سُمك الرصف الأمثل.

وتُسرد أدناه الخطوات الأساسية المدرجة في طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) وتُعرض على شكل مخططات انسيابية في الشكل (٥-١١).

١- اختر استراتيجية تصميم تجريبي. ويمكن أن يستخدم مصمم الرصف طريقة خاصة بالجهة التي يعمل لصالحها لتحديد المقطع العرضي للتصميم التجريبي للرصف.
٢- اختر معايير مؤشر الأداء المناسبة (القيمة الحدية/العتبة) وصمم مستوى موثوقية للمشروع. وتتضمن معايير مؤشر التصميم أو الأداء مقادير عيوب الرصف الرئيسة والنعومة التي يمكن أن تستدعي القيام بإعادة تأهيل أو إعادة إنشاء كبيرة. ويمكن أن تكون هذه المعايير جزءًا من سياسات الجهة لتقرير وقت إعادة التأهيل أو إعادة الإنشاء. كما يمكن للمستخدم تحديد معايير مؤشر الأداء لأخذها بعين الاعتبار.
٣- احصل على جميع المدخلات الخاصة بالتصميم التجريبي للرصف قيد النظر. ويمكن أن تكون هذه الخطوة بحد ذاتها جهدًا يستهلك وقتًا طويلاً، غير أنها هي التي تفصل طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) عن طرق التصميم الأخرى. وتسمح طريقة (MEPDG) للمصمم بتحديد المدخلات باستخدام هيكل هرمي يُختار فيه جهد تقدير مدخلات معينة بناءً على كل من أهمية المشروع وأهمية المدخلات والموارد المتاحة. ويُحصل على المدخلات المطلوبة لتشغيل البرنامج الحاسوبي باستخدام أحد مستويات الجهد الثلاثة التي لا يجب أن تكون متسقة لجميع مدخلات تصميم معين. وهذا يسمح للمستخدم باستخدام "أفضل البيانات المتاحة" لجميع المدخلات. وتُجمع مستويات الإدخال الهرمية تحت ستة

مواضيع عامة: (١) معلومات عامة عن المشروع، (٢) معايير التصميم، (٣) المرور، (٤) المناخ، (٥) تحديد الطبقات الإنشائية، (٦) خواص المواد (بما في ذلك سمات التصميم).

٤- قم بإجراء التحليل وافحص المدخلات والمخرجات للوقوف على مدى معقوليتها من الناحية الهندسية. وتُحسب التغييرات على مدى عمر التصميم في كل من خواص الطبقات، والأضرار، والعيوب الرئيسة، ومؤشر الخشونة الدولي (IRI). وتتضمن الخطوات الفرعية المنبثقة من هذه الخطوة رقم ٤ ما يلي:

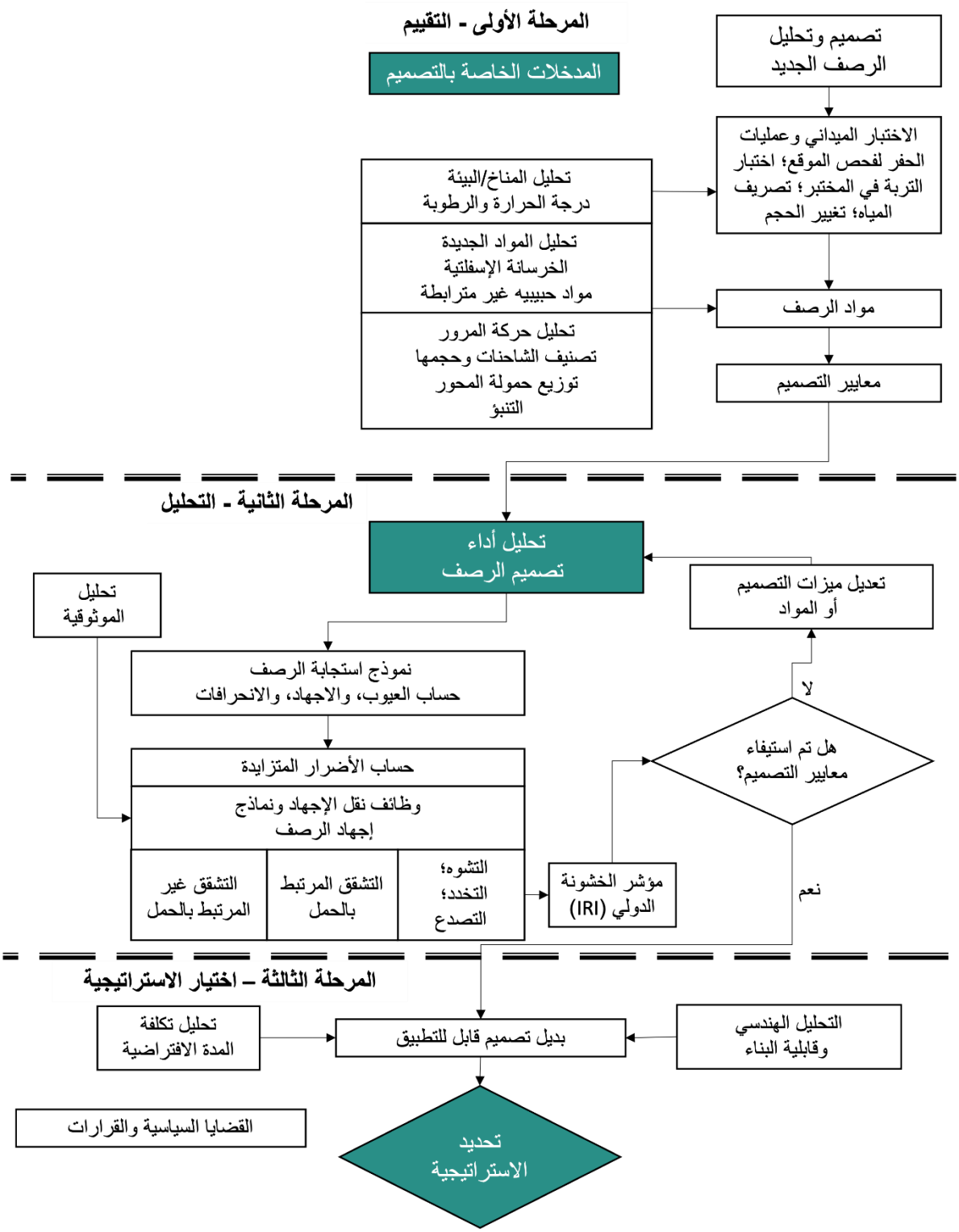
أ- افحص ملخص الإدخال للتحقق من صحة المدخلات. إذ ينبغي إكمال هذه الخطوة بعد كل تشغيل للبرنامج الحاسوبي حتى يصبح المصمم أكثر دراية بالبرنامج ومدخلاته.

ب- افحص المخرجات التي تشتمل على كل من المعلمات الخاصة بالعملية الوسيطة (مثل: القيم المناخية)، والقيم الشهرية لمعامل الطبقة، لتحليل الرصف المرن لتحديد مدى معقوليتها، ومؤشرات الأداء المحسوبة (عيوب الرصف ومؤشر الخشونة الدولي).

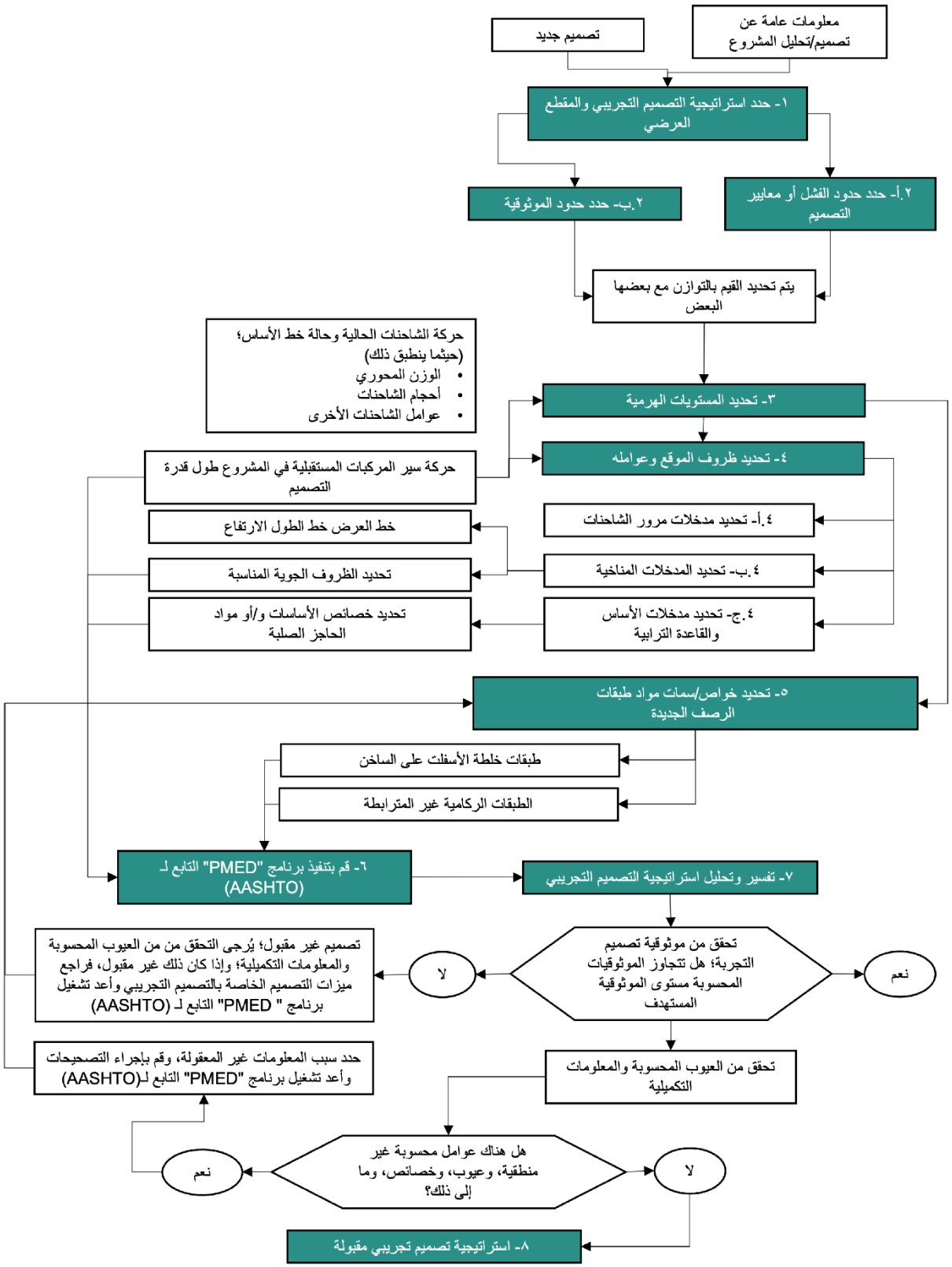
ج- قيّم ما إذا كان التصميم التجريبي يمكن أن تستوفي كل معيار من معايير مؤشرات الأداء عند مستوى موثوقية التصميم المختار للمشروع. وكما هو مذكور أعلاه، فإن مؤشر الخشونة الدولي هو عبارة عن معلمة مخرجات متوقعة بمرور الوقت ومقياس لنعومة السطح. ويُحسب مؤشر الخشونة الدولي (IRI) من خلال توقعات العيوب الأخرى، وعوامل الموقع، ومؤشر الخشونة الدولي الأولي.

د- إذا لم يُستوفَ أي من المعايير، حدد كيف يمكن معالجة هذا النقص عن طريق تغيير المواد المستخدمة، أو تحديد طبقات المواد، أو سماكة الطبقة، أو خصائص التصميم الأخرى.

٥- راجع التصميم التجريبي، حسب الحاجة؛ فإذا كان التصميم التجريبي يحتوي على أخطاء في الإدخال، أو حالات شاذة في مخرجات المواد، أو تجاوز معايير الفشل عند المستوى المحدد من الموثوقية، فيجب مراجعة المدخلات/التصميم التجريبي وإعادة تشغيل البرنامج. كما أن للطريقة عملية أو سمة آلية تتكرر حتى الحصول على سُمك الرصف الأمثل الذي يعطي تصميمًا مُجديًا.



الشكل (٥–١٠) مخطط انسيابي مفاهيمي لعملية التصميم/التحليل المكونة من ثلاث مراحل للطريقة الميكانيكية-التجريبية لتصميم الرصف (AASHTO, 2020).



الشكل (٥–١١) مخطط انسيابي للخطوات اللازمة لإكمال تحليل استراتيجية التصميم التجريبي (AASHTO, 2020).

٥-٣-٢ نموذج الرصف:

تشمل الرصفيات المرنة ما يلي، كما هو موضح في الشكل (٥-١٢).



الشكل (٥–١٢) استراتيجيات تصميم رصف مرن جديد يمكن محاكاته مع طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020).

استراتيجيات تصميم رصف مرن جديد يمكن محاكاته مع طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020).

الرصفيات المرنة التقليدية – الرصفيات المرنة التي تتكون من أسطح الخرسانة الأسفلتية بسُمك أقل من ١٥٠ مم (٦ بوصة) موضوعة فوق طبقات الأساس الحبيبية غير المترابطة (حجر أو حصى مكسر وخلطات الركام والتربة). ويمكن أن تحتوي الرصفيات المرنة التقليدية -أيضًا- على قاعدة ترابية مُثبتة أو مُعالجة فوق تربة التأسيس.

الخرسانة الأسفلتية ذات القوة العميقة - الرصفيات المرنة التي تتكون من سطح خرسانة أسفلتية سميك نسبيًا وخرسانة أسفلتية كثيفة التدرج أو خلطة أساس أسفلتي مُثبت يزيد إجمالي عمقه عن ١٥٠ مم (٦ بوصة) وموضوع فوق طبقة أساس حبيبية. ويمكن أن تحتوي الرصفيات المرنة ذات القوة العميقة -أيضًا- على قاعدة ترابية مُثبتة أو مُعالجة فوق تربة التأسيس.

رصفيات الخرسانة الأسفلتية ذات العمق الكامل - توضع طبقات الخرسانة الأسفلتية على قاعدة ترابية مُثبتة أو توضع مباشرة على أرضية الطريق المرفوعة أو تربة الأساس المُعدة.

الرصفيات شبه الصلبة - تتكون الرصفيات شبه الصلبة من خلطات خرسانة أسفلتية موضوعة فوق أساس مُعالج بالأسمنت (CTB)، أو أساس خرساني نحيف (LCB)، أو خلطات أسمنتية ركامية (CAM)، في وجود أو عدم وجود طبقة ما تحت أساس حبيبية. ويمكن أن تشتمل المواد الأسمنتية -أيضًا- على الجير والرماد الجيري المتطاير ومثبتات الأسمنت البورتلاندي. ويُوصى بتضمين طبقة ما تحت أساس حبيبية في استراتيجية التصميم لأن جميع الشبكات العصبية لعوامل شدة الإجهاد للتنبؤ بالتشققات الانعكاسية أُشتقت باستخدام طبقة ما تحت أساس حبيبية.

٥-٣-٣ معايير التصميم:

تستخدم معايير التصميم وقيمها الحدية (قيم العتبة) لتحديد عمر هيكل الرصف وتعد جميعها مدخلات للتحليل. وتتم عملية تصميم رصف مرن جديد بتحديد القيم الحدية (قيم العتبة) المنشودة للإجهادات التي سيتعرض لها الرصف في نهاية عمر التصميم (فترة التحليل)، العيوب ومؤشرات الأداء التي تؤخذ في الاعتبار في الرصف المرن هي كما يلي:

- الشقوق التمساحية أو شقوق الكلل (الشقوق من أسفل إلى أعلى): شكل من أشكال الإجهاد أو التشقق المرتبط بحمل العجلات، والتي تعرف بكونها سلسلة من الشقوق المترابطة (بنمط تمساحي) تبدأ في الجزء السفلي من طبقات الخرسانة الأسفلتية. وتُحسب التشققات التمساحية كنسبة مئوية (٪) من إجمالي مساحة المسار.
- الشقوق الطولية (الشقوق من أعلى إلى أسفل): شكل من أشكال الإجهاد أو التشقق المرتبط بحمل العجلات يحدث في مدى مسار العجلة وتعرف بكونها تشققات موازية في الغالب لخط منتصف الرصف. تبدأ الشقوق الطولية عند سطح الخرسانة الأسفلتية أو بالقرب منه وتظهر في البداية في شكل شقوق طولية قصيرة تصبح متصلة طوليًا مع استمرار تحميل الشاحنات. وتقاس التشققات الطولية بوحدة تقدر بإجمالي م/كم (قدم/ميل)، متضمنة كلا مساري العجلة.
- الشقوق المستعرضة: شقوق غير مرتبطة بحمل العجلات والتي تكون في الغالب عمودية على خط منتصف الرصف وناتجة عن درجات الحرارة المنخفضة أو الدورات الحرارية. وتقاس الشقوق المستعرضة بوحدة م/كم (قدم/ميل). كما يمكن أن تظهر الشقوق المستعرضة في الرصفيات المرنة الجديدة التي تقع في المناطق ذات المناخ المعتدل أو الدافئ وتحدث نتيجة آلية مختلفة، مثل انكماش الخرسانة الأسفلتية. يُحسب طول الشقوق المستعرضة بواسطة الانكماش أو آلية أخرى باستخدام معاملات المعايرة المشتقة في المناخات الدافئة والمعتدلة بناء على متوسط درجات حرارة الهواء السنوية.
- التشقق الانعكاسي: من المتوقع حدوث نوعين من التشققات الانعكاسية: التشققات الانعكاسية المستعرضة وتشققات الكلل الانعكاسية:
  - التشقق الانعكاسي المستعرض: تشقق الأحمال غير المرتبطة بالعجلات الذي يحدث نتيجة الانعكاس الناجم عن الوصلات أو التشققات المستعرضة في طبقة الرصف السفلية. ووحدات التشقق هي م/كم (قدم/ميل).
  - تشقق الكلل الانعكاسي: تشققات تمساحية من أسفل لأعلى مرتبطة بالحمل أو تشققات طولية مُتضمّنة بسبب الانعكاس الناجم عن التشققات الموجودة في طبقة الرصف السفلية. وحدات التشققات هي نسبة مئوية (٪) من إجمالي مساحة المسار. أما بالنسبة للتشققات الطولية، فإن المنطقة المتشققة تقاس بالطول الإجمالي للتشققات الطولية مضروبة في القيمة ٠,٣٠٥ م (١ قدم)، وهي عرض الشق.
- التخدد أو عمق الأخدود: هبوط سطحي في مسار العجلة ناتج عن تشوه لدن أو دائم في كل طبقة من طبقات الرصف. ويمثل عمق الأخدود أقصى فرق عمودي في منسوب الشكل الجانبي المستعرض لسطح الخرسانة الأسفلتية ومنسوب سلك ممدود بعرض المسار. وحدة التخدد هي مم (بوصة) وتمثل الحد الأقصى لمتوسط عمق الأخدود بين كلا مساري العجلة. وتُحسب -أيضًا- أعماق الأخدود داخل طبقات الخرسانة الأسفلتية الحبيبية غير المترابطة والطبقات التأسيسية.
- تُحدد الملاءمة الوظيفية -كميًّا- من خلال نعومة الرصف؛ حيث إن المعلمة المستخدمة لتحديد نعومة الرصف هي مؤشر الخشونة الدولي (IRI). ويُقدر مؤشر الخشونة الدولي بشكل تجريبي كدالة في كل من عيوب الرصف وعوامل الموقع وتقدير مؤشر الخشونة الدولي في وقت الإنشاء (مؤشر الخشونة الدولي الأولي). وتقاس النعومة بوحدة م/كم (قدم/ميل).

٥-٣-٤ العمر التصميمي:

العمر التصميمي للرصف الجديد هو الفترة الزمنية من الإنشاء الأولي إلى الوقت الذي يتدهور فيه الرصف إنشائيًا إلى درجة تتطلب إعادة تأهيل أو إعادة إنشاء كبيرة. ويُعرّف العمر التصميمي لتصميم تجريبي معين بكل من الإنشاء الأولي للرصف ولحين الوصول إلى حالة الرصف الحرجة المحددة. وتصمم الرصفيات المرنة لفترة أداء تمتد إلى ٢٠ عامًا. ولإطالة العمر التصميمي، ينبغي النظر في تضمين عملية إعادة تأهيل واحدة.

٥-٣-٥ الأحمال المرورية:

يعد مرور الشاحنات عنصرًا أساسيًا في البيانات الخاصة بالتصميم الإنشائي /التحليل لهياكل الرصف. وتستخدم طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) بيانات طيف الحمل المحوري الكامل لكل نوع من أنواع المحاور لكلا طريقتي تصميم رصف جديد وإعادة التأهيل. ويُستخدم كل من حجم المرور، وتوزيعه على المسارات، وعوامل تعديل الحجم (توزيع الفئات وعوامل النمو المروري وما إلى ذلك)، وبيانات الأوزان، كمدخلات، إلى جانب بعض البيانات المتنوعة مثل ضغط الهواء في الإطارات.

ويُحصل على أطياف الحمل المحوري من معالجة بيانات الوزن-في أثناء-الحركة (WIM). وتعد معلمات الإدخال التالية خاصة بالموقع ويجب الحصول عليها من إدارة المرور أو إدارة التخطيط.

- المتوسط السنوي المروري اليومي للشاحنات (AADTT): يمثل المتوسط السنوي المروري اليومي للشاحنات متوسطًا مُرجحًا بين حركة مرور الشاحنات في أيام الأسبوع وعطلة نهاية الأسبوع. ويتم الحصول على المتوسط السنوي المروري اليومي للشاحنات من بيانات الوزن-في أثناء- الحركة (WIM) أو عدادات المركبات الآلية (AVC) أو تعداد المرور اليدوي. وتكون القيمة المُدخلة في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED) هي المتوسط السنوي المروري اليومي للشاحنات بعد فتح الطريق أمام حركة المرور أو بعد اكتمال إعادة التأهيل. وبالإضافة إلى ذلك، ينبغي على المستخدم التأكد من أن القيمة المُدخلة تمثل كلا الاتجاهين وجميع المسارات. وإذا ما تم إدخال حجم مرور الشاحنات لاتجاه واحد، فينبغي تعيين النسبة المئوية للشاحنات في اتجاه التصميم عند نسبة ١٠٠ بالمائة.
- النسبة المئوية للشاحنات في المسار التصميمي: تُحدد هذه النسبة المئوية من خلال فئة الشاحنة الأساسية للطريق. وتمثل فئة الشاحنات الأساسية فئة الشاحنات التي تقوم بغالبية الرحلات (تطبيقات الأحمال) التي تستخدم الطريق. وبمعنى آخر، تُقدر النسبة المئوية للشاحنات في المسار التصميمي لكل فئة من فئات الشاحنات، وتُستخدم فئة الشاحنات السائدة لتقدير هذه القيمة. ويمكن تقدير النسبة المئوية للشاحنات في المسار التصميمي من خلال بيانات عدادات المركبات الآلية أو بيانات تعداد المركبات اليدوي.
- النسبة المئوية للشاحنات في الاتجاه التصميمي: تمثل هذه القيمة النسبة المئوية للشاحنات في الاتجاه التصميمي بالنسبة لجميع الشاحنات التي تستخدم الطريق في كلا الاتجاهين. ويمكن تقدير هذه القيمة من خلال بيانات عدادات المركبات الآلية أو بيانات تعداد المركبات اليدوي.
- السرعة التشغيلية: تؤثر سرعة الشاحنة بشكل واضح على قيمة المعامل الديناميكي (E*) المتنبأ به للخرسانة الأسفلتية، وبالتالي، العيوب. وتؤدي السرعات المنخفضة إلى قيم تلفيات تزايدية أعلى (مزيد من التشقق الناتج عن الكلل والتخدد والتصدع الأكثر عمقًا). ويُقترح استخدام الحد الأقصى المُعلن لسرعة الشاحنات لتقييم التصميمات التجريبية، ما لم يكن الرصف موجودًا في منطقة خاصة منخفضة السرعة، مثل ميول الصعود الحادة ومحطة الحافلات.
- نمو مرور الشاحنات: تشتمل طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) على إمكانية استخدام معدلات نمو مختلفة لفئات مختلفة من الشاحنات، غير أنه يفترض أن معدل النمو يكون مستقلاً بمرور الوقت؛ أو بمعنى آخر، يظل معدل الزيادة كما هو طوال فترة التحليل. وتكون معدلات النمو المعتمدة على فئة الشاحنات ذات تأثير كبير على أداء الرصف المتوقع ويمكن تحديدها بأكبر قدر ممكن من المعلومات حول السلع التي تُنقل داخل وعبر موقع المشروع.
- سعة المسار: هناك ثمة قيود عملية على مقدار حجم المرور تحول دون قدرة المصمم من زيادة سعة المسار. وللمستخدم أن يختار النظر في قدرة سعة الطريق أو تجاهلها. ولا ينبغي استخدام خيار سعة المسار عندما يستخدم المصمم أو يفترض مسار واحد في اتجاه واحد.

تُسرد معلمات إدخال مرور الشاحنات المطلوبة والمسجلة في بيانات الوزن-في أثناء-الحركة (WIM) وتُعرّف في هذا القسم الفرعي. ويمكن إنشاء ملفات الإدخال الخاصة بالمرور بشكل منفصل، والتي تمثل كل نافذة فردية لبيانات الإدخال (مثل: المحاور لكل شاحنة، أو عامل الضبط الشهري، أو توزيع الحمل المحوري الفردي). وفيما يلي -أيضًا- إرشادات حول تحديد مدخلات هذه القيم.

- توزيعات الحمل المحوري (فردي، ترادفي، ثلاثي، رباعي): يمثل توزيع الحمل المحوري كمية هائلة من البيانات، لذلك ينبغي إكمال معالجة البيانات خارج البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED). وهناك العديد من أدوات أو حزم البرامج الحاسوبية المتاحة لمعالجة بيانات توزيع الحمل المحوري. وتتمتع أدوات البرامج الحاسوبية هذه بقدرات ووظائف مختلفة، ويمكن أن يرغب المستخدمون في تقييم الخيارات لتحديد الأداة الأكثر ملاءمة لاحتياجات جهتهم. وتُضمن خمسة من أطياف أحمال المحور المُطبّعة (Normalized Axle-Load Spectra, NALS) كتوزيعات افتراضية من المستوى ٣ للمدخلات في طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG). ويسرد الجدول (٥-١٣) ويعطي وصفًا لأطياف أحمال المحور المُطبّعة (NALS) الافتراضية. كما يتضمن الجدول (٥-١٣) -أيضًا- بعض التوصيات لتحديد أطياف أحمال المحور المُطبّعة الافتراضية لاستخدامها في طريق محدد. ويُوصى بفهم نمط تحميل حركة المرور المتوقع على طول موقع المشروع أو مقطع الطريق عند اختيار أطياف أحمال المحور المُطبّعة الافتراضية. ولفهم نمط التحميل، ينبغي أن يتضمن تحليل خصائص مرور الشاحنات ما يلي:
  - النسبة المئوية للشاحنات العابرة مقابل شاحنات التوصيل المحلية.
  - البضائع السائدة التي تنقلها الشاحنات.

- توزيع الحجم المروري المُطبّع (normalized) للشاحنات.

ينبغي -أيضًا- بذل جهد لتحديد حالة التحميل للشاحنات من الفئة ٩؛ ففي بعض الحالات، يمكن أن تكون بيانات الوزن-في أثناء- الحركة للموازين المتنقلة متاحة للموقع، ويمكن أن تكون هذه البيانات غير دقيقة لحساب أطياف أحمال المحور المُطبّعة لموقع ما غير أنها يمكن أن تكون مفيدة في إيجاد حالة تحميل وصفية أو لتأكيد اختيار أطياف أحمال المحور المُطبّعة الافتراضية المتضمنة في الجدول (٥-١٣).

- توزيع الحجم المروري المُطبّع (normalized) للشاحنات: هناك حاجة إلى معرفة متوسط توزيع الحجم المروري المُطبّع (normalized) للشاحنات عند توفر بيانات محدودة للوزن-في أثناء-الحركة (WIM) وذلك لتحديد إجمالي توزيع الأحمال المحورية للمشروع. ويمثل توزيع الحجم المروري المُطبّع (normalized) للشاحنات النسبة المئوية لكل فئة من فئات الشاحنات ضمن توزيع مرور الشاحنات. ويُحدد هذا التوزيع المُطبّع من خلال تحليل بيانات عدادات المركبات الآلية كما أنه يمثل البيانات التي جُمعت على مدى عدة سنوات. يتضمن الجدول (٥-١٤) التوزيعات الافتراضية للحجم المروري المُطبّع (normalized) للشاحنات كدالة في مجموعات التصنيف المروري للشاحنات المختلفة. وتُستخدم قيمة مؤشر التصنيف المروري للشاحنات لتحديد توزيع مناسب للحجم المروري للشاحنات بالنسبة لطريق محدد ويمكن تحديده من خلال تعدادات المرور والتصنيف الوظيفي للطرق. ويحدد الجدول (٥-١٥) مجموعات التصنيف المروري للشاحنات المضمنة في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED) لتحديد توزيع الحجم المروري المُطبّع (normalized) وتوزيع الوزن المحوري المُطبّع للشاحنات.
- تكوينات الحمل المحوري (تباعد المحاور وقاعدة العجلات): يُسجل تباعد المحاور في قاعدة بيانات الوزن-في أثناء-الحركة (WIM). وقد وجد أن هذه القيم ثابتة نسبيًا بالنسبة لفئات الشاحنات القياسية. وتُسرد القيم المستخدمة في جميع جهود المعايرة أدناه وهي مقترحة للاستخدام ما لم يكن لفئة الشاحنات السائدة تكوين محاور مختلف.
  - تباعد المحاور المترادفة (المزدوج): ١,٣١ م (5/8 51 بوصة).
  - تباعد المحاور الثلاثية: ١,٢٥ م (3/16 49 بوصة).
  - تباعد المحاور الرباعية: ١,٢٥ م (3/16 49 بوصة).
- عوامل التوزيع الشهرية: تُستخدم عوامل التوزيع الشهرية لتوزيع مرور الشاحنات داخل كل فئة على مدار العام. واستُخدم عامل توزيع شهري قدره ١,٠ لجميع فئات الشاحنات أثناء جميع أعمال المعايرة. ويمكن تحديد عوامل التوزيع الشهرية هذه من خلال الوزن-في أثناء-الحركة (WIM) أو عدادات المركبات الآلية أو التعدادات اليدوية لمرور الشاحنات.

الجدول (٥–١٣) توزيع التحميل المروري المُطبّع (normalized) المتضمن في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020).

تصنيف التحميل المحوري	وصف توزيع التحميل المحوري المُطبّع	الاستخدام الموصى به
NCHRP 1-37A	أطياف أحمال المحور المُطبّعة (NALS) الافتراضية المطورة في تقرير البرنامج الوطني التعاوني لأبحاث الطرق (NCHRP 1-37A) والذي يتضمن نسبًا أعلى من الشاحنات ذات الحمل الزائد.	الطرق التي بها نسبة أعلى من الشاحنات ذات الحمل الزائد.
ثقيل	طرق الشحن أو الطرق الريفية والحضرية ذات متوسط سنوي مروري يومي للشاحنات أكبر من ٢,٠٠٠ في كلا الاتجاهين. وأطياف أحمال المحور المُطبّعة هذه ذات التحميل الثقيل ممثلة للطرق التي تُحمّل فيها أغلبية كبيرة من المحاور المترادفة بشكل زائد. وتوجد بشكل شائع على الطرق الريفية التي تخدم حركات التنقل الكبيرة للشاحنات للمسافات الطويلة.	الطرق الريفية التي تخدم حركات التنقل الكبيرة للشاحنات طويلة المدى.
نمطي	الطرق غير المخصصة للشحن أو الطرق الحضرية والريفية ذات متوسط سنوي مروري يومي للشاحنات أكبر من ١,٠٠٠ في كلا الاتجاهين. وتحتوي أطياف أحمال المحور المُطبّعة هذه على عدد أكبر من المحاور المحملة، بأوزان (١٣,٦٠٨-١٥,٤٢٢) كجم (٣٠,٠٠٠-٣٤,٠٠٠ رطل) من المحاور غير المحملة، بأوزان (٥,٤٤٣-٧,٢٥٧) كجم (١٢,٠٠٠-١٦,٠٠٠ رطل). وهذا توزيع متوازن بنسب إجمالية متشابهة للأحمال الخفيفة والثقيلة. وفي أطياف أحمال المحور المُطبّعة هذه، تحمل ٥٥٪ من المحاور أحمالًا أكبر من ٩,٠٧٢ كجم (٢٠,٠٠٠ رطل).	الطرق التي تخدم مزيجًا من حركات تنقل الشاحنات الحضرية والطويلة المدى.
خفيف	الطرق غير المخصصة للشحن أو الطرق الحضرية والريفية ذات متوسط سنوي مروري يومي للشاحنات أقل من ١,٠٠٠ في كلا الاتجاهين (الطرق الشريانية الفرعية، والتجميعية). وتحتوي أطياف أحمال المحور المُطبّعة هذه على محاور مترادفة ذات حمل أعلى (بأوزان بين ٥,٤٤٣-٧,٢٥٧ كجم (١٢,٠٠٠-١٦,٠٠٠ رطل)) من المحاور ذات التحميل الثقيل (بأوزان بين ١٣,٦٠٨-١٥,٤٢٢ كجم (٣٠,٠٠٠-٣٤,٠٠٠ رطل)). وفي أطياف أحمال المحور المُطبّعة هذه، تحمل ٤٠٪ من المحاور أحمالًا أكبر من ٩,٠٧٢ كجم (٢٠,٠٠٠ رطل).	الطرق الريفية والحضرية والطرق الأخرى التي تكون فيها نسبة ٧٠٪ أو أكثر من الشاحنات غير محملة بالكامل.
عام	تكون أطياف أحمال المحور المُطبّعة هذه مشابه جدًا للتصنيف "النمطي" ويمثل متوسط أطياف أحمال المحور المُطبّعة للعديد من مواقع الوزن-في أثناء-الحركة (WIM) لأداء الرصف على المدى الطويل (LTPP).	انظر التصنيف "النمطي".

الجدول (٥–١٤) وصف مجموعات التصنيف المروري للشاحنات وما يقابلها من قيم افتراضية لتوزيع فئات الشاحنات المتضمنة في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020).

مجموعة التصنيف المروري للشاحنات ووصفها		توزيع فئات الشاحنات (٪)								
		٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠	١١	١٢	١٣
١	**طريق رئيس لشاحنات بمقطورة واحدة (النوع ١)**	١,٣	٨,٥	٢,٨	٠,٣	٧,٦	٧٤,٠	١,٢	٣,٤	٠,٦	٠,٣

مجموعة التصنيف المروري للشاحنات ووصفها		توزيع فئات الشاحنات (٪)								
		٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠	١١	١٢	١٣
٢	طريق رئيس لشاحنات بمقطورة واحدة (النوع 2)	٢,٤	١٤,١	٤,٥	٠,٧	٧,٩	٦٦,٣	١,٤	٢,٢	٠,٣	٠,٢
٣	طريق رئيس لشاحنات بمقطورة واحدة (النوع ١)	٠,٩	١١,٦	٣,٦	٠,٢	٦,٧	٦٢,٠	٤,٨	٢,٦	١,٤	٦,٢
٤	طريق رئيس لشاحنات بمقطورة واحدة (النوع ٣)	٢,٤	٢٢,٧	٥,٧	١,٤	٨,١	٥٥,٥	١,٧	٢,٢	٠,٢	٠,٤
٥	طريق رئيس لشاحنات بمقطورة واحدة ومتعددة المقطورات (النوع ٢)	٠,٩	١٤,٢	٣,٥	٠,٦	٦,٩	٥٤,٠	٥,٠	٢,٧	١,٢	١١,٠
٦	طريق شاحنات متوسطة خفيفة وشاحنات بمقطورة واحدة (النوع ١)	٢,٨	٣١,٠	٧,٣	٠,٨	٩,٣	٤٤,٨	٢,٣	١,٠	٠,٤	٠,٣
٧	طريق رئيس لشاحنات مختلطة (النوع ١)	١,٠	٢٣,٨	٤,٢	٠,٥	١٠,٢	٤٢,٢	٥,٨	٢,٦	١,٣	٨,٤
٨	طريق رئيس لشاحنات متعددة المقطورات (النوع ١)	١,٧	١٩,٣.	٤,٦	٠,٩	٦,٧	٤٤,٨	٦,٠	٢,٦	١,٦	١١,٨
٩	طريق شاحنات متوسطة خفيفة وشاحنات بمقطورة واحدة (النوع ٢)	٣,٣	٣٤,٠	١١,٧	١,٦	٩,٩	٣٦,٢	١,٠	١,٨	٠,٢	٠,٣
١٠	طريق رئيس لشاحنات مختلطة (النوع ٢)	٠,٨	٣٠,٨	٦,٩	٠,١	٧,٨	٣٧,٥	٣,٧	١,٢	٤,٥	٦,٧
١١	طريق رئيس لشاحنات متعددة المقطورات (النوع ٢)	١,٨	٢٤,٦	٧,٦	٠,٥	٥,٠	٣١,٣	٩,٨	٠,٨	٣,٣	١٥,٣
١٢	طريق شاحنات متوسطة خفيفة وشاحنات بمقطورة واحدة (النوع ٣)	٣,٩	٤٠,٨	١١,٧	١,٥	١٢,٢	٢٥,٠	٢,٧	٠,٦	٠,٣	١,٣
١٣	طريق رئيس لشاحنات مختلطة (النوع ٣)	٠,٨	٣٣,٦	٦,٢	٠,١	٧,٩	٢٦,٠	١٠,٥	١,٤	٣,٢	٠,٣
١٤	طريق رئيس لشاحنات خفيفة (النوع ١)	٢,٩	٥٦,٩	١٠,٤	٣,٧	٩,٢	١٥,٣	٠,٦	٠,٣	٠,٤	٠,٣
١٥	طريق رئيس لشاحنات خفيفة (النوع ٢)	١,٨	٥٦,٥	٨,٥	١,٨	٦,٢	١٤,١	٥,٤	٠,٠	٠,٠	٥,٧
١٦	طريق رئيس لشاحنات خفيفة ومتعددة المقطورات	١,٣	٤٨,٤	١٠,٨	١,٩	٦,٧	١٣,٤	٤,٣	٠,٥	٠,١	١٢,٦
١٧	طريق حافلات رئيس	٣٦,٣٢	١٤,٦	١٣,٤	٠,٨	١٤,٦	١٧,٨	٠,٥	٠,٨	٠,١	١,٥

الجدول (٥–١٥) تعريفات وأوصاف مجموعات التصنيف المروري للشاحنات (AASHTO, 2020).

الحافلات في حركة المرور	السلع التي الجاري نقلها حسب نوع الشاحنة		رقم مجموعة التصنيف العادي للشاحنات
	شاحنات متعددة المقطورات	شاحنات بمقطورة واحدة وشاحنات أحادية الوحدة	
منخفض إلى منعدم (أقل من ٢ ٪)	عدد كبير نسبيًا من الشاحنات متعددة المقطورات (أكبر من ١٠٪)	معظمها شاحنات بمقطورة واحدة	٥
		نسبة عالية من الشاحنات ذات المقطورة الواحدة، ولكن مع بعض الشاحنات ذات الوحدة الواحدة	٨
		مرور شاحنات مختلط مع نسبة أعلى من الشاحنات ذات المقطورة الواحدة	١١
		مرور شاحنات مختلط بنسب متساوية تقريبًا من الشاحنات أحادية الوحدة والشاحنات ذات المقطورة الواحدة	١٣
		شاحنات ذات وحدة واحدة في الغالب	١٦
	كمية معتدلة من الشاحنات متعددة المقطورات (٢ - ١٠٪)	شاحنات ذات وحدة واحدة في الغالب	٣
		حركة مرور الشاحنات المختلطة مع نسبة أعلى من الشاحنات ذات المقطورة الواحدة	٧
		حركة مرور شاحنات مختلطة بنسب متساوية تقريبًا من الشاحنات أحادية الوحدة وذات المقطورة الواحدة	١٠
		معظمها شاحنات ذات وحدة واحدة	١٥
منخفض إلى معتدل (أكبر من ٢ ٪)	منخفض إلى منعدم (أقل من ٢ ٪)	معظمها شاحنات ذات وحدة واحدة	١
		معظمها شاحنات بمقطورة واحدة، ولكن بنسبة مئوية منخفضة من الشاحنات أحادية الوحدة	٢
		معظمها شاحنات بمقطورة واحدة، مع وجود كمية منخفضة إلى متوسطة من الشاحنات أحادية الوحدة	٤
		مرور شاحنات مختلط مع نسبة أعلى من الشاحنات أحادية المحور	٦
		مرور شاحنات مختلط بنسبة متساوية تقريبًا من الشاحنات أحادية الوحدة وذات المقطورة الواحدة	٩
		مرور مختلط في وجود نسبة أعلى من الشاحنات أحادية الوحدة	١٢
		معظمها شاحنات ذات وحدة واحدة	١٤
طريق حافلات رئيس (أكبر من ٢٥٪)	منخفض إلى منعدم (أقل من ٢ ٪)	مرور شاحنات مختلط بنسب متساوية تقريبًا من الشاحنات أحادية الوحدة وذات المقطورة الواحدة	١٧

تُسرد معلمات مدخلات مرور الشاحنات المطلوبة وغير المسجلة في بيانات الوزن-في أثناء-الحركة (WIM) وتُعرّف فيما يلي. كما تُعطى -أيضًا- إرشادات حول تحديد المدخلات لهذه القيم.

- تباعد الإطارات المزدوجة: تفترض طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) أن جميع محاور الشاحنات القياسية المضمنة في بيانات الوزن-في أثناء-الحركة (WIM) تحتوي على إطارات مزدوجة. ويمثل تباعد الإطارات المزدوجة غالبية الشاحنات التي تستخدم الطريق وهي مأخوذة من مواصفات صناعة النقل بالشاحنات. ويمكن أن أُختيرت القيمة الافتراضية التي تبلغ ٣٠٠ مم (١٢ بوصة) بناءً على تباعد الإطارات التي تستخدمها معظم الشاحنات. ويُوصى باستخدام هذه القيمة الافتراضية ما لم يكن للنوع السائد من الشاحنات ظروف تحميل خاصة. ويمكن محاكاة استخدام الإطارات المفردة الفائقة أو الإطارات المفردة العادية عن طريق زيادة تباعد الإطارات المزدوجة إلى قيمة يصبح فيها

التأثير من أحد الإطارات المزدوجة ضئيلاً بالنسبة للآخر. ويجب أن تكون المسافة بين الإطارات المزدوجة حتى يحدث ذلك ٠,١٥٢ م (٦٠ بوصة) في معظم الحالات.

- ضغط الهواء في الإطارات: تفترض طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) ضغط إطار ثابت يمثل حالة التشغيل (ضغط الهواء للإطارات الساخنة) لجميع ظروف التحميل. وقد استُخدمت قيمة وسطية قدرها ٠,٨٣ ميجا باسكال (١٢٠ رطل لكل بوصة مربعة) في جميع أعمال المعايرة. ويُوصى باستخدام هذه القيمة ما لم يكن ضغط الهواء للإطارات الساخنة معروف من الدراسات السابقة أو أجريت محاكاة حالة تحميل خاصة.
- التمايل العرضي للأحمال المحورية: تفترض طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) ترنحًا ثابتًا لجميع الشاحنات؛ حيث استُخدمت قيمة ٢٥٠ مم (١٠ بوصة) في جميع أعمال المعايرة، بغض النظر عن عرض المسار. وفي بعض المناطق الحضرية، أُنشئت مسارات ذات عرض ضيق بسبب قيود عرض حرم الطريق. ويُوصى باستخدام قيمة تمايل عرضي أقل لعروض المسارات الضيقة (أقل من ٣ أمتار (١٠ أقدام))؛ وتُقترح قيمة ٢٠٠ مم (٨ بوصة) ما لم يقم المستخدم بقياس هذه القيمة. وبالمثل، يوصى باستخدام قيمة تمايل عرضي أعلى للمسارات العريضة (أكبر من ٣,٦ م (١٢ قدمًا))؛ وتُقترح قيمة ٣٠٠ مم (١٢ بوصة) ما لم يقم المستخدم بقياس هذه القيمة.
- قاعدة عجلات الشاحنة: قاعدة عجلات قاطرات (جرارات) الشاحنات هي المسافة من محور التوجيه الأمامي إلى المحور التالي؛ ونظرًا لتفاوت أطوال قاطرات الشاحنات، فقد قُسم ذلك إلى فئات: قصيرة بطول ٣,٦ م (١٢ قدمًا)، ومتوسطة بطول ٤,٥ م (١٥ قدمًا)، وطويلة بطول ٥,٥ م (١٨ قدمًا).

٥-٣-٦ العوامل البيئية:

هناك حاجة إلى توفر بيانات مناخية تفصيلية للتنبؤ بعيوب الرصف، والتي يتضمن بيانات مثل درجة الحرارة لكل ساعة، وتساقط الأمطار، وسرعة الرياح، والرطوبة النسبية، والغطاء السحابي. وتُستخدم هذه البيانات للتنبؤ بدرجة الحرارة ومحتوى الرطوبة في كل طبقة من طبقات الرصف، بالإضافة إلى توفير بعض المدخلات لمعلمة عامل الموقع لنماذج التنبؤ بالنعومة. ويمكن أن تكون البيانات المناخية التي تحتاجها طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) واردة من أي مصدر يوفر البيانات على مدار الساعة بشكل متواصل. وتتكون مصادر البيانات المناخية المصاحبة للبرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED) من مجموعات بيانات مستوعبه على نظام شبكي يغطي العالم بأسره. ويحتوي البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED) على عدد كبير من محطات الطقس المتاحة للاختيار لسهولة الاستخدام والتنفيذ. ويحتاج المستخدم ببساطة إلى معرفة خط الطول وخط العرض للمشروع وسيختار البرنامج تلقائيًا العديد من مواقع الطقس الأقرب إلى الموقع المحدد بناءً على الارتفاع والمسافة المماثلين. تشمل المصادر الحالية لبيانات المناخ على مدار الساعة ما يلي:

- إعادة التحليل بأثر رجعي في العصر الحديث ٢ (Modern-Era Retrospective Reanalysis2, MERRA2).
- إعادة التحليل الإقليمي لأمريكا الشمالية (North American Regional Reanalysis, NARR)

تتوفر بيانات خطوط الطول والعرض والارتفاع وعدد الأشهُر للمستخدم عند اختيار محطات الطقس التي سيستخدمها البرنامج لإنشاء محطة طقس افتراضية لتنبؤات العيوب في موقع المشروع.

يمكن تحديد محطات الطقس أو نقاط الشبكة المتعددة لتوفير البيانات المناخية التي يحتاجها البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED). وتُستخدم محطات الطقس التي يختارها المستخدم لحساب بيانات الطقس الافتراضية لموقع المشروع. ويُوصى باستخدام العديد من محطات الطقس أو نقاط الشبكة لحساب التغيرات في البيانات المناخية لموقع ما بدقة، أو في حال لم يكن المشروع يقع مباشرةً بجوار موقع نقطة شبكة معينة. وينبغي أن يكون لمحطات الطقس أو نقاط الشبكة المحددة لإنشاء بيانات طقس افتراضية لموقع المشروع ارتفاعات مماثلة، إن أمكن، رغم أن درجات الحرارة تُعدّل حسب اختلافات الارتفاع. ويُوصى باستخدام بيانات الطقس الافتراضية في المناطق التي توجد بها اختلافات كبيرة في الارتفاع على مسافة قصيرة (المناطق الجبلية).

في حال وجود مدى كبير من الظروف المناخية، يُوصى بالتقسيم إلى مناطق مناخية متشابهة (تقريبًا نفس درجة الحرارة المحيطة والرطوبة) وتحديد محطات الطقس التمثيلية لكل من هذه المناطق. ويجب أن تكون هذه المناطق وفقًا لمناطق درجات الحرارة في المملكة العربية السعودية المحددة في الشكل (٣-٤).

من أجل إعداد ملف البيانات المناخية الممثلة لمناطق مُمثلة في المملكة العربية السعودية، يمكن استخدام قاعدة بيانات (Iowa Environmental Mesonet, IEM) (أو أي قاعدة بيانات مناسبة أخرى)؛ حيث إن قاعدة بيانات (Iowa Environmental Mesonet, IEM) التي ترعاها جامعة ولاية أيوا (الأمريكية)، تجمع كمية هائلة من البيانات البيئية حول العالم وتعمل على أرشفتها. وتتعاون قاعدة بيانات (IEM) مع شبكات ووكالات المراقبة على مستوى العالم لجمع وفرز البيانات المناخية وإتاحتها من خلال الموقع الشبكي الخاص بهم. كما تعمل قاعدة بيانات (IEM) على أرشفة المشاهدات المؤتمتة للطقس في المطارات وذلك من خلال المطارات حول العالم. وتُعرف هذه البيانات باسم بيانات تقرير الأرصاد الجوية (METAR) وهو المصطلح المستخدم لوصف تقرير الطقس الروتيني للطيران (NOAA, 2020). ويوجد بالمملكة العربية السعودية ما يقرب من ٣٥ محطة أرصاد جوية متوفرة في قاعدة

بيانات (IEM). وتحتوي البيانات على جميع معلمات الطقس الخمس التي يحتاجها البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED) إلى جانب العديد من المعلومات الأخرى. ويجب اتباع الخطوات التالية:

- حدد محطة الأرصاد الجوية الأقرب إلى الطرق.
- اجمع المعلمات المناخية الخمس: درجة الحرارة، وسرعة الرياح، ونسبة سطوع الشمس، وتساقط الأمطار، والرطوبة النسبية، لكل ساعة ولمدة ٢٤ شهرًا
- أعد البيانات المناخية لمدة ٢٤ شهرًا على مدار الساعة لمحطة الطقس المحددة بتنسيق ملف يقبله البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED)، وهو ملف بامتداد (HCD.) يحتوي على جميع المعلمات المناخية المطلوبة.

٥-٣-٧ خواص المواد:

النهج العام لتحديد مدخلات التصميم للمواد في طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) هو نظام هرمي المستويات؛ إذ يعتمد النهج الهرمي في أبسط أشكاله وأكثرها عملية على الفلسفة القائلة بأن مستوى الجهد الهندسي المبذول في عملية تصميم الرصف وفي تحديد خصائص مواد الرصف والقاعدة التأسيسية ينبغي أن يكون متسقًا مع الأهمية النسبية لتصميم المشروع وحجمه وتكلفته.

يتضمن المستوى ١ للمدخلات اختبارات معملية شاملة؛ بينما بالمقابل يتطلب المستوى ٣ من المصمم تقدير أنسب قيمة إدخال للتصميم لخاصية المواد بناءً على الخبرة، مع إجراء قليل من الاختبارات أو بدون إجرائها. ويعرض الجدول (٥-١٦) أنواع المواد الرئيسة التي تتوفر لها قيم افتراضية (المستوى ٣ للمدخلات) في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED). وتصنف تربة القاعدة الترابية وفقًا لنظام (AASHTO) لتصنيف التربة الوارد في الجدول (٣-١) (AASHTO M145). أما مدخلات المستوى الثاني فتُقدر من خلال الارتباطات مع خواص المواد الأخرى التي عادة ما تُقاس في المختبر أو الحقل. وبغض النظر عن مستوى الإدخال المُختار، يقوم البرنامج بإجراء التحليل نفسه. وكما هو مذكور أعلاه، ستُنهى معظم عمليات التحليل باستخدام مستويي الإدخال ٢ و٣ لأن طبقات الرصف لا زالت لم توضع بعد في الوقت الذي يُنجز فيه التحليل الإنشائي.

الجدول (٥–١٦) أنواع المواد الرئيسة لطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (AASHTO, 2020) (MEPDG).

مواد أسفلتية	تربة القاعدة الترابية
خلطة حجرية بمعجون الأسفلت (SMA)	تربة حصوية (A-1، A-2)
خرسانة أسفلتية (AC)	تربة رملية
أسفلت ذو تدرج كثيف	رمل سائب (A-3)
أسفلت ذو تدرج مفتوح	رمل كثيف (A-3)
خلطات أساس أسفلتية مُثبتة	رمل طمي (A-2-4, A-2-5)
خلطات أسفلت رملي	رمل طيني (A-2-6, A-2-7)
أسفلت مخلوط على البارد	تربة طمية (A-4, A-5)
معالج في مصنع مركزي	تربة طينية منخفضة اللدونة (A-6)
معاد تدويره في الموقع	جافة-صلبة
	رطبة قاسية
	رطبة/مشبعة ناعمة
	تربة طينية عالية اللدونة (A-7)
	جافة-صلبة
	رطبة قاسية
	رطبة/مشبعة ناعمة
طبقة أساس/ ما تحت الأساس حبيبية غير مُثبتة	**مواد مُثبتة كيميائيًا**
طبقة أساس/ ما تحت الأساس حبيبية	ركام مُثبت بالأسمنت

مواد أسفلتية	تربة القاعدة الترابية
طبقة ما تحت الأساس الرملية	أسمنت التربة
أسفلت المعاد تدويره على البارد (يُستخدم كركام)	رماد متطاير للأسمنت الجيري
رصف الأسفلت المستصلح (RAP) (متضمنًا الطحن)	رماد جيري متطاير
مطحون في الموقع	تربة مُثبتة بالجير
رصف أسفلتي معاد تدويره على البارد (خرسانة أسفلتية بالإضافة إلى طبقة الأساس/ ما تحت الأساس الحبيبية)	ركام مُثبت بأسمنت ذو تدرج مفتوح
قاعدة الطريق	
صلبة وضخمة ومستمرة	
متصدعة للغاية، ومتآكلة بالنحت	

٥-٣-٧-١ خلطات الخرسانة الأسفلتية :

يجب معرفة الخصائص الأساسية لجميع أنواع طبقات خلطة الخرسانة الأسفلتية. يسرد الجدول (٥-١٧) خواص مواد الخرسانة الأسفلتية اللازمة لأنواع مواد الخرسانة الأسفلتية المدرجة في الجدول (٥-١٦)، كما يحدد بروتوكولات الاختبار الموصى بها والمصادر الأخرى لتقدير هذه الخواص.

تُجمّع خواص الإدخال لجميع أنواع مواد الخرسانة الأسفلتية في خواص حجمية وخواص هندسية، وتشمل الخواص الحجمية الفراغات الهوائية، ومحتوى الأسفلت الفعَّال بالحجم، وتدرج الركام، وكثافة الخلطة، ودرجة الأسفلت. ويجب أن تكون الخواص الحجمية ممثلة للخلطة بعد الدمك قبل فتح الرصف لمرور الشاحنات. ولن تكون القيم الخاصة بالمشروع متاحة للمصمم لأن طبقات الرصف الجديدة لم يكن قد تم إنتاجها ووضعها بعد. ولكن يمكن أن تكون هذه المعلمات متاحة من سجلات الإنشاء السابقة.

تشتمل الخواص الهندسية أو الميكانيكية لمواد الخرسانة الأسفلتية على المعامل الديناميكي، والامتثال للزحف، وقوة الشد غير المباشرة، ومعاملات التشوه اللدن، ومعاملات قوة الكلل. ويُوصى باستخدام المستويين ٢ و٣ للمدخلات لتقدير هذه الخواص ما لم يكن لدى الجهة أو المستخدم مكتبة تضم نتائج الاختبارات المعملية لخلطات مختلفة من الخرسانة الأسفلتية. ويعد استخدام بيانات الاختبار الموجودة بالمكتبة ضمن المستوى ٢ للمدخلات.

الجدول (٥–١٧) المواد الأسفلتية وبروتوكولات الاختبار لقياس مدخلات خواص المواد لطبقات الخرسانة الأسفلتية الجديدة، المستوى ١ للمدخلات (AASHTO, 2020).

نوع التصميم	الخاصية المُقاسة	مصدر البيانات		بروتوكول الاختبار المُوصى به و/أو مصدر البيانات
		اختبار	تقدير	
خواص الخرسانة الأسفلتية الجديدة كما هو منفذ قبل فتحها أمام مرور الشاحنات	المعامل الديناميكي	X		AASHTO T342
	معاملات التشوه اللدن	X		طريقة (NCHRP project 9-30A); NCHRP report #719 (30)
	معاملات قوة الكلل	X		AASHTO T321
	قوة الشد	X		AASHTO T322 ASTM D6931
	الامتثال للزحف	X		AASHTO T322
	نسبة بواسون		x	بروتوكول الاختبار الوطني غير متوفر؛ لذا، استخدم القيم الافتراضية للبرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم

نوع التصميم	الخاصية المُقاسة	مصدر البيانات		بروتوكول الاختبار المُوصى به و/أو مصدر البيانات
		اختبار	تقدير	
				الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED)
	امتصاصية الموجات القصيرة السطحية		x	بروتوكول الاختبار الوطني غير متوفر؛ لذا، استخدم القيم الافتراضية للبرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED)
	التوصيل الحراري	X		ASTM E1952
	السعة الحرارية	X		ASTM D2766
	معامل الانكماش الحراري		x	بروتوكول الاختبار الوطني غير متوفر؛ لذا، استخدم القيم الافتراضية للبرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED)
	محتوى الأسفلت الفعَّال بالحجم	X		AASHTO T308 (نتيجة الاختبار هي محتوى الأسفلت بالوزن الذي يلزم تحويله إلى محتوى أسفلتي فعَّال بالحجم)
	الفراغات الهوائية	X		AASHTO T166
	الوزن النوعي للركام	X		AASHTO T84 AASHTO T85
	التدرج	X		AASHTO T27
	وزن الوحدة	X		AASHTO T166
	الفراغات المملوءة بالأسفلت (VFA)	X		AASHTO T209

يُوصى باستخدام الخلطات المتخصصة، مثل خلطة الأسفلت الدافئ (WMA) أو الخلطات المنتجة باستخدام رصف الأسفلت المستصلح (RAP) وحصى الأسفلت المستصلح (RAS)، بحيث يُقاس المعامل الديناميكي المركب، ومعاملات التشوه اللدن، ومعاملات قوة الكلل في المختبر وتستخدم كمدخل خرسانة أسفلتية من المستوى ١. وفي حال سبق إنشاء مكتبة لبيانات اختبار الخرسانة الأسفلتية، فيمكن للمستخدم اختيار نتائج الاختبار من خلطات الخرسانة الأسفلتية السابقة الأكثر تشابهًا مع تلك المستخدمة أو استخدام متوسط النتائج من الخلطات المماثلة الأخرى.

فيما يلي ملخصًا لمعلمات الإدخال والقيم الموصي بها لخلطات الخرسانة الأسفلتية.

- تدرج الركام: راجع الجزء (٣-٦) أو استخدم القيم القريبة من متوسط مدى مواصفات المشروع أو استخدم متوسط القيم من سجلات الإنشاء السابقة لنوع معين من الخلطة.
- الفراغات الهوائية، ومحتوى الأسفلت الفعَّال بالحجم أو الكثافة، وفراغات الركام المعدني (VMA)، والفراغات المملوءة بالأسفلت (VFA): راجع الجزء (٣-٦) أو استخدم القيم القريبة من متوسط مدى مواصفات المشروع أو استخدم متوسط القيم من سجلات الإنشاء السابقة لنوع معين من الخلطة.
- نسبة بواسون: استخدم القيم المحسوبة لدرجة الحرارة، واستخدم النموذج التنبؤي لحساب نسبة بواسون من خلال درجات حرارة الرصف.
- المعامل الديناميكي: يمكن استخدام المستويين ٢ و٣ للمدخلات ما لم يكن لدى الجهة مكتبة لنتائج الاختبارات. وتتضمن خواص المواد اللازمة للمستويين ٢ و٣ للمدخلات التدرج، وتصنيف درجة أداء الأسفلت، ونتائج الاختبار من مقياس القص

الديناميكي (DSR) (AASHTO T315). ويتوفر خياران لتقدير المعامل الديناميكي - أحدهما مدرج على أنه النموذج القائم على لزوجة "NCHRP 1-37 A" والآخر مدرج على أنه النموذج القائم على "NCHRP 1-40D*" (معامل القص الديناميكي للأسفلت). وقد حُددت عوامل المعايرة العامة لجميع معادلات الخرسانة الأسفلتية التنبؤية باستخدام النموذج القائم على لزوجة "NCHRP 1-37 A". ويعتمد الخيار المحدد على البيانات التاريخية المتاحة للمصمم.

- الامتثال للزحف وقوة الشد غير المباشرة: الامتثال للزحف وقوة الشد غير المباشر (IDT) مطلوبة فقط في حالة الخلطات الأسفلتية الجديدة للطبقة السطحية للرصف؛ وليست هناك حاجة لها لطبقات الخرسانة الأسفلتية التي تحت الطبقة السطحية في رصف الخرسانة الأسفلتية الجديد. ويُقاس امتثال زحف الشد غير المباشر (IDT) للطبقة السطحية عند ٠، - ١٠، و- ٢٠ درجة مئوية (٣٢، و١٤، و - ٤ درجة فهرنهايت) وفقًا لمواصفة (AASHTO T322) للمستوى ١ من المدخلات، أما بالنسبة للمستوى ٢ للمدخلات، فلا يُقاس الامتثال للزحف إلا عند - ١٠ درجة مئوية (١٤ درجة فهرنهايت). وبالنسبة للمستوى ٣ للمدخلات، تُستخدم معادلات الانحدار لحساب الامتثال للزحف. وتُناقش مستويات المدخلات المختلفة لقوة الشد غير المباشر (IDT) أدناه:
  - بالنسبة للمستوى ١ للمدخلات، يقيس المستخدم قوة الشد غير المباشر (IDT) عند درجات حرارة اختبار متعددة وفقًا للمواصفة (ASTM D6931). ويُوصى باستخدام أربع درجات حرارة: - ١٠ و٠ و١٢,٨ و ٢٦,٧ درجة مئوية (١٤ و ٣٢ و ٥٥ و ٨٠ درجة فهرنهايت) للمواد الرابطة القياسية. أما بالنسبة للمواد الرابطة الصلبة، فإن درجات حرارة الاختبار الموصى بها هي: - ١٠ و٤,٤ و ٢١,١ و ٣٧,٨ درجة مئوية (١٤ و ٤٠ و ٧٠ و ١٠٠ درجة فهرنهايت). وتُدخل نقاط قوة الشد غير المباشر (IDT) المقاسة ودرجات حرارة الاختبار في البرنامج الحاسوبي؛ حيث يعمل البرنامج على اشتقاق المعاملات الخاصة بالخلطة لمعادلة الانحدار التالية للتنبؤ بقوة الشد غير المباشر عند أي درجة حرارة. ولا يزال يُفترض أن الحد الأقصى لقوة الشد غير المباشر (IDT) هو - ١٠ درجة مئوية (١٤ درجة فهرنهايت).

$$IDT_T = IDT_{max} \times \left[1 - 10^a \times \left(\frac{40}{T}\right)^b\right] \qquad \textbf{المعادلة (٥-١٨)}$$

حيث:

IDT_T = قوة الشد غير المباشر في درجة الحرارة، T.

IDT_{Max}= أقصى قوة شد غير مباشر مُقاسة عند - ١٠ درجة مئوية (١٤ درجة فهرنهايت).

T = درجة الحرارة بوحدة درجة فهرنهايت.

a, b = معاملات الانحدار (القيم العامة هي a = - ٠,٥٥ و b = ٢,٥)

  - بالنسبة للمستوى ٢ للمدخلات، تُقاس قوة الشد غير المباشر عند - ١٠ درجة مئوية (١٤ درجة فهرنهايت)، وتستخدم معادلة الانحدار أعلاه لحساب قوة الشد غير المباشر في درجات حرارة اختبار أخرى باستخدام معاملات الانحدار العامة للخلطة.
  - بالنسبة للمستوى الثالث للمدخلات، يتم حساب الحد الأقصى لقوة الشد غير المباشر (IDT) عند - ١٠ درجة مئوية (١٤ درجة فهرنهايت) باستخدام معادلة الانحدار المضمنة في الجدول (٥-١٨). وتُستخدم المعادلة (٥-١٨) لحساب قوة الشد غير المباشر (IDT) عند درجات الحرارة الأخرى باستخدام معاملات الانحدار العامة للخلطة.
- امتصاصية الموجات القصيرة السطحية: استخدم القيمة الافتراضية ٠,٨٥.
- معامل الانكماش الحراري للخلطة: استخدم القيم الافتراضية للخلطات والركام المختلفة.
- درجة الحرارة المرجعية: ينبغي استخدام ٢١,١ درجة مئوية (٧٠ درجة فهرنهايت).
- التوصيل الحراري للأسفلت: استخدم القيمة الافتراضية المعينة في البرنامج الحاسوبي، وهي ٢,١٦ واط/م•درجة كالفن (١,٢٥ وحدة حرارية بريطانية/ساعة•قدم•درجة فهرنهايت).
- السعة الحرارية للأسفلت: استخدم القيمة الافتراضية المعينة في البرنامج الحاسوبي، وهي ١,١٧٢,٣ جول/كجم•درجة كلفن (٠,٢٨ وحدة حرارية بريطانية/رطل•درجة فهرنهايت). على الرغم من أن المستوى ١ للمدخلات هو فئة المدخلات المفضلة لتصميم الرصف، إلا أن العديد من الجهات لم تكتسب بعد قدرات الاختبار لتوصيف خلطات الخرسانة الأسفلتية. لذا، لُخص المستويان ٢ و ٣ للمدخلات في الجدول (٥-١٨). بالنسبة لمعظم التحليلات، فإن من المسموح به للمصممين استخدام خليط من مدخلات المواد من المستويات ١ و٢ و ٣ التي تستند إلى احتياجاتهم الفريدة وقدراتهم على إجراء الاختبارات. وفيما يلي مناقشة أكثر تفصيلاً حول تحديد الخواص الحجمية المستخدمة لتقدير معلمات الإدخال لخلطات الخرسانة الأسفلتية الجديدة.
- الفراغات الهوائية، V_a (AASHTO T269): يجب أن تمثل الفراغات الهوائية عند الإنشاء متوسط الفراغات الهوائية المتوقعة في الموقع بعد دمك الخرسانة الأسفلتية باستخدام مداحل (رصّاصات)، ولكن

قبل فتح الطريق أمام مرور الشاحنات. ولن تكون هذه القيمة متاحة أثناء التصميم الإنشائي لأنها لم تُنتج بعد. ويُوصى بالحصول على هذه القيمة من سجلات الإنشاء السابقة لخلطات مماثلة أو يمكن للمصمم إدخال القيمة المستهدفة من مواصفات المشروع.

- الوزن النوعي السائب لخلطة الركام المركب، G_{sb} (AASHTO T84 و AASHTO T85): تعتمد هذه القيمة على نوع الركام المستخدم في الخرسانة الأسفلتية وتدرجه. وسيكون لدى معظم الجهات مدى متوقع لهذه القيمة مستمد من تصميمات الخلطات السابقة لنوع الركام المستخدم ومصدره والتدرج المركب (نوع الخلطة) المحدد للمشروع.
- أقصى وزن نوعي للخلطة، G_{mm}، (AASHTO T209): تعتمد هذه القيمة على نوع محتوى كل من الركام والتدرج والأسفلت المستخدم في الخرسانة الأسفلتية. وسيكون لدى معظم الجهات مدى متوقع لهذه القيمة مستمد من تصميمات الخلطات السابقة باستخدام مصدر الركام وتدرجه (نوع الخلطة) المحدد للمشروع. ويمكن حساب أقصى وزن نوعي من خلال خواص المكونات في حال عدم وجود معلومات تاريخية تخص خلطة الخرسانة الأسفلتية المحددة للمشروع.
- فراغات الركام المعدني، VMA: تمثل فراغات الركام المعدني أحد مدخلات التنبؤ بالتشقق الحراري وتحديد الخواص الحجمية الأخرى. ويجب أن تمثل فراغات الركام المعدني حالة الخلطة بعد أن بعد دمكها باستخدام مداحل (رصّاصات)، ولكن قبل فتح الطريق أمام مرور الشاحنات. ولن تكون هذه القيمة متاحة أثناء التصميم الإنشائي لأنها لم تُنتج وتوضع بعد. ومن المستحسن أن تُحسب القيمة من خلال الخواص الحجمية الأخرى التي حُصل عليها من سجلات الإنشاء لخلطات مماثلة من حيث النوع، ومصادر الركام، والتدرجات.
- محتوى الأسفلت الفعَّال بالحجم، V_{be}: يلزم أن يمثل محتوى الأسفلت الفعَّال بالحجم محتوى الأسفلت في الموقع، بعد أن توضع الخلطة في آلة الرصف (الفرّادة). ولن تكون هذه القيمة متاحة أثناء التصميم الإنشائي لأنها لم تُنتج بعد. ويُوصى بحساب القيمة من خلال الخواص الحجمية الأخرى كما هو موضح في الجدول (٥-١٨).

الجدول (٥–١٨) معلمات المدخلات والقيم المُوصى بها؛ قدرات اختبار محدودة أو معدومة للخرسانة الأسفلتية (المستويين ٢ و/أو ٣ للمدخلات) (AASHTO, 2020).

الخاصية المُقاسة	المستويان ٢ أو ٣ للمدخلات
المعامل الديناميكي E_{HMA}	• لا يوجد معامل ديناميكي، وتجدر الحاجة إلى إجراء الاختبارات المعملية. • استخدم معادلة (MEPDG EAC) التنبؤية؛ وتتمثل المدخلات في التدرج، ولزوجة الأسفلت، وتكرار التحميل، ومحتوى الفراغ الهوائي، ومحتوى الأسفلت الفعَّال بالحجم. ويمكن الحصول على متغيرات المدخلات من خلال اختبار عينات الخلطة المعدة في المختبر أو من البيانات التاريخية للجهة. • استخدم قيم (Ai-VTS) النموذجية بناءً على درجة تماسك الأسفلت (درجة الأداء أو اللزوجة أو درجة الاختراق).
قوة الشد	استخدم معادلة الانحدار الخاصة بطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG): $$TS\ (psi) = 7416.712 - 114.016 \times V_a - 0.304 \times V_a^2 - 122.592 \times VFA + 0.704 \times VFA^2 + 405.71 \times log(Pen77) - 2039.296 \times log(A)$$ حيث: TS = قوة الشد غير المباشر عند - ١٠ درجة مئوية (١٤ درجة فهرنهايت) ، تقاس بالرطل لكل بوصة مربعة. V_a = الفراغات الهوائية بخلطة الأسفلت الساخن، كما شُيد، تقاس بالنسبة المئوية (٪). VFA = الفراغات المملوءة بالأسفلت، كما شُيدت، تقاس بالنسبة المئوية (٪). Pen77 = اختراق الأسفلت عند ٢٥ درجة مئوية (٧٧ درجة فهرنهايت) ، يقاس بوحدة مم/١٠. A = قاطع الإحداثي الصادي لحساسية درجة حرارة ولزوجة الأسفلت. ويمكن الحصول على متغيرات المدخلات من خلال اختبار عينات الخلطة المعدة في المختبر أو من السجلات التاريخية للجهة.
الامتثال للزحف، D(t)	استخدم معادلة الانحدار الخاصة بطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG): $$D(t) = D_1 \times t^m$$

الخاصية المُقاسة	المستويان ٢ أو ٣ للمدخلات
	$$\log(D_1) = -8.524 + 0.01306 \times T + 0.7957 \times \log(V_a) + 2.0103 \times \log(VFA) - 1.923 \times \log(A)$$ $$m = 1.1628 - 0.00185 \times T - 0.04596 \times V_a - 0.01126 \times VFA + 0.00247 \times Pen77 + 0.001683 \times T \times Pen77^{0.4605}$$ حيث: t = الفترة الزمنية، تُقاس بالأشهر. T = درجة الحرارة التي يُقاس عندها الامتثال للزحف، تقاس بدرجة فهرنهايت. Vα = فراغات الخرسانة الأسفلتية، كما شُيدت، تقاس بالنسبة المئوية (٪).. VFA = الفراغات المملوءة بالأسفلت، كما شُيدت، تقاس بالنسبة المئوية (٪). Pen77 = اختراق الأسفلت عند ٢٥ درجة مئوية (٧٧ درجة فهرنهايت) ، يقاس بوحدة مم/١٠ A = قاطع الإحداثي الصادي لحساسية درجة حرارة ولزوجة الأسفلت. ويمكن الحصول على متغيرات المدخلات من خلال اختبار عينات الخلطة المعدة في المختبر أو من السجلات التاريخية للجهة.
الفراغات الهوائية	استخدم خلطة كما شُيدت من القيم الخاصة بالنوع المتوفرة من السجلات الإنشائية السابقة.
محتوى الأسفلت الحجمي الفعَّال	استخدم خلطة كما شُيدت من القيم الخاصة بالنوع المتوفرة من السجلات الإنشائية السابقة. وعادةً ما يرد ذكر نسبة محتوى الأسفلت بالوزن في تصميم الخلطة والسجلات الإنشائية. ويكون محتوى الأسفلت الفعَّال بالحجم مساويًا لفراغات الركام المعدني مطروحًا منه فراغات الهواء.
وزن الوحدة الإجمالي	استخدم خلطة كما شُيدت من القيم الخاصة بالنوع المتوفرة من السجلات الإنشائية السابقة.
الخاصية المُقاسة	**المستوى ٣ المُوصى به للمدخلات**
نسبة بواسون	استخدم معادلة تنبؤية تعتمد على درجة الحرارة المدرجة في طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG).
امتصاصية الموجات القصيرة السطحية	استخدم القيمة الافتراضية للبرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED) البالغة 0.85.
التوصيل الحراري	تتراوح القيم النموذجية للخرسانة الأسفلتية بين (٠,٤٢٢ - ٣,٤٦) واط/م•درجة كلفن (٠,٢٤٤ - ٢,٠ وحدة حرارية بريطانية/قدم•ساعة•درجة فهرنهايت). استخدم القيمة الافتراضية البالغة ٢,١٦ واط/م•درجة كلفن (١,٢٥ وحدة حرارية بريطانية/قدم•ساعة• درجة فهرنهايت).
السعة الحرارية	تتراوح القيم النموذجية للخرسانة الأسفلتية بين (٤١٨,٦٨ - ٢٠٩٣,٤) جول/كجم•درجة كلفن (٠,١ - ٠,٥٠ وحدة حرارية بريطانية/رطل•درجة فهرنهايت). استخدم القيمة الافتراضية البالغة ١١٧٢,٣جول/كجم•درجة كلفن (٠,٢٨ وحدة حرارية بريطانية/رطل•درجة فهرنهايت).
معامل الانكماش الحراري	استخدم المعادلة التنبؤية التابعة لطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) والموضحة فيما يلي: $$L_{mix} = \frac{VMA \times B_{ac} + V_{AGG} \times B_{AGG}}{3 \times V_{total}}$$ حيث: L_{mix} = المعامل الخطي للانكماش الحراري لخلطة الخرسانة الأسفلتية (١/درجة مئوية) B_{ac}= المعامل الحجمي للانكماش الحراري للأسمنت الأسفلتي في الحالة الصلبة (١/درجة مئوية) B_{AGG}= المعامل الحجمي للانكماش الحراري للركام (١/درجة مئوية) VMA = حجم الفراغات في الركام المعدني، يُقاس كنسبة مئوية ٪ (يساوي حجم الفراغات الهوائية بالإضافة إلى النسبة المئوية لحجم الأسمنت الأسفلتي، مطروحًا منه نسبة حجم الأسمنت الأسفلتي الممتص) V_{AGG}= حجم الركام في الخلطة، يُقاس كنسبة مئوية ٪ V_{TOTAL} = ١٠٠ ٪

الخاصية المُقاسة	المستويان ٢ أو ٣ للمدخلات
	القيم النموذجية للمعامل الخطي للانكماش الحراري، والمعامل الحجمي للانكماش الحراري للأسمنت الأسفلتي في الحالة الصلبة، والمعامل الحجمي للانكماش الحراري للركام المقاسة في مختلف الدراسات البحثية هي كما يلي: L_{mix} = ×٣,٤ - ٢,٢ $L_{mix} = 2.2 - 3.4\times10^{-5}$ / °C (خطي) $B_{ac} = 3.5 - 4.3\times10^{-4}$ / °C (مكعب) $B_{AGG} = 21 - 37\times10^{-6}$ / °C (مكعب)

٢-٧-٣-٥ مواد الأساس الحبيبي غير المترابطة وجسر الطريق (embankment) المُعد هندسيًا:

هناك حاجة إلى معرفة الخواص المادية (الطبيعية) والهندسية لطبقات الرصف والأساسات غير المترابطة. وتشمل الخواص الطبيعية كلًا من الكثافة الجافة، ومحتوى الرطوبة، وخواص التصنيف، بينما تشتمل الخاصية الهندسية على معامل المرونة. ويجب تحديد قيم معامل المرونة عند محتوى الرطوبة الأمثل وأقصى كثافة جافة، وبالتالي ضمان أن الطبقات غير المترابطة تكون مواتية للظروف عند فتح الرصف لمرور الشاحنات.

بالنسبة للمستوى ٣ للمدخلات، يمكن استخدام قيم معامل المرونة الافتراضية، ويمكن تقدير المعامل من خلال الخواص الأخرى للمواد (المستوى ٢ للمدخلات)، أو يمكن قياس المُعامل في المختبر (المستوى ١ للمدخلات).

يُلخص جدول (٥-١٩) معلمات المستوى ١ للمدخلات اللازمة لأنواع مواد التربة غير المترابطة للأساس الحبيبي، وطبقة ما تحت الأساس، وجسر الطريق، وتربة القاعدة الترابية. وتُسرد -أيضًا- في الجدول (٥-١٩) بروتوكولات الاختبار الموصي بها. وعلى الرغم من أن المستوى ١ للمدخلات هو المفضل بالنسبة لتصميم الرصف، إلا أن معظم الجهات غير مجهزة بمرافق الاختبار اللازمة لتوصيف خصائص مواد الرصف. ومن ثم، يُوصى باستخدام المستويين ١ و ٢ للمدخلات، والمُعطيان في الجدول (٥-٢٠)، وذلك بالنسبة للحالة الأكثر احتمالية حيث لا يكون لدى الجهات سوى قدرة اختبار محدودة أو معدومة لتوصيف خصائص مواد الأساس الحبيبي غير المقيد، وطبقة ما تحت الأساس، وجسر الطريق، وتربة القاعدة الترابية. بالنسبة لمعظم التحليلات، فإنه من المسموح به للمصممين استخدام خليط من مدخلات المواد من المستويات ١ و ٢ و ٣ التي تستند إلى احتياجاتهم الفريدة وقدراتهم على إجراء الاختبارات.

الجدول (٥–١٩) متطلبات المواد الخاصة بالمستوى ١ للمدخلات للتربة الحبيبية غير المترابطة لكل من الأساس، وما تحت الأساس، وتربة القاعدة الترابية، وجسر الطريق، وكذلك بروتوكولات الاختبار للمواد الجديدة والقائمة (AASHTO, 2020).

نوع التصميم	الخاصية المُقاسة	مصدر البيانات		بروتوكول الاختبار المُوصى به و/أو مصدر البيانات
		اختبار	تقدير	
جديد (عينات معملية)	هناك خياران: معاملات الانحدار (k_1) و (k_2) و (k_3) للنموذج التأسيسي المعمم الذي يُعرّف معامل المرونة كدالة في حالة الإجهاد وأجري له تحليل انحدار من اختبارات معامل المرونة المعملية. حدد متوسط معامل مرونة التصميم لحالة الإجهاد في الموقع والمتوقع حدوثها من خلال اختبارات معامل المرونة المعملية.	x		(AASHTO T307) أو (NCHRP 1-28A) يكون نموذج طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) المعمم على النحو التالي: $M_R = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$ حيث: M_R= معامل المرونة ، يُقاس بالرطل لكل بوصة مربعة $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = الإجهاد الكلي σ_1 = الإجهاد الأساسي الرئيس σ_2 = الإجهاد الأساسي المتوسط σ_3 = الإجهاد الأساسي الفرعي الذي يحصر الضغط

نوع التصميم	الخاصية المُقاسة	مصدر البيانات		بروتوكول الاختبار المُوصى به و/أو مصدر البيانات
		اختبار	تقدير	
				τ_{oct}= إجهاد القص ثماني السطوح $=\frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2}$ p_a = تطبيع الإجهاد k_1 ، k_2 ، k_3 = ثوابت الانحدار
	نسبة بواسون		X	لا توجد مواصفة اختبار وطنية، لذا استخدم القيم الافتراضية لطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG)
	أقصى كثافة جافة	x		AASHTO T180
	محتوى الرطوبة الأمثل	x		AASHTO T180
	التدرج	x		AASHTO T88
	الثقل النوعي	x		AASHTO T100
	الموصلية الهيدروليكية المشبعة	x		AASHTO T215
	معلمات منحنى خصائص المياه والتربة	x		لوحة الضغط (AASHTO T99)، أو ورقة الترشيح (AASHTO T180)، أو خلية درجة الحرارة (AASHTO T100)

الجدول (٥–٢٠) قيم ومعلمات المستويين ٢ و ٣ للمدخلات الموصى بها لخواص مواد التربة غير المترابطة لكل من الأساس، وما تحت الأساس، وجسر الطريق، والقاعدة الترابية (AASHTO, 2020).

<table>
<tr><th>المدخلات المطلوبة</th><th>مستوى المدخلات المُوصى به</th></tr>
<tr><td>معامل المرونة</td><td>استخدم المستوى ٣ للمدخلات بناءً على مواد التربة غير المترابطة لكل من الأساس، وما تحت الأساس، وجسر الطريق، والقاعدة الترابية. ويُحدد تصنيف (AASHTO) للتربة باستخدام التدرج، ومؤشر اللدونة، وحد السيولة للمواد (AASHTO M145).
<table>
<tr><th rowspan="2">تصنيف (AASHTO) للتربة</th><th colspan="2">معامل المرونة الموصى به عند الرطوبة المُثلى (AASHTO T180)</th></tr>
<tr><th>الأساس/ ما تحت الأساس</th><th>جسر الطريق والقاعدة الترابية</th></tr>
<tr><td>A-1-a</td><td>٢٧٦ ميجا باسكال (٤٠,٠٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td><td>٢٠٤ ميجا باسكال (٢٩,٥٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-1-b</td><td>٢٦٢ ميجا باسكال (٣٨,٠٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td><td>١٨٣ ميجا باسكال (٢٦,٥٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-2-4</td><td>لا ينطبق</td><td>١٦٩ ميجا باسكال (٢٤,٥٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-2-5</td><td>لا ينطبق</td><td>١٤٨ ميجا باسكال (٢١,٥٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-2-6</td><td>لا ينطبق</td><td>١٤٥ ميجا باسكال (٢١,٠٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-2-7</td><td>لا ينطبق</td><td>١٤١ ميجا باسكال (٢٠,٥٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-3</td><td>لا ينطبق</td><td>١١٤ ميجا باسكال (١٦,٥٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-4</td><td>لا ينطبق</td><td>١١٤ ميجا باسكال (١٦,٥٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-5</td><td>لا ينطبق</td><td>١٠٧ ميجا باسكال (١٥,٥٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-6</td><td>لا ينطبق</td><td>١٠٠ ميجا باسكال (١٤,٥٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-7-5</td><td>لا ينطبق</td><td>٩٠ ميجا باسكال (١٣,٠٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
<tr><td>A-7-6</td><td>لا ينطبق</td><td>٨٠ ميجا باسكال (١١,٥٠٠ رطل/بوصة مربعة)</td></tr>
</table>
ملحوظة: يمكن استخدام القيم الافتراضية المذكورة أعلاه بافتراض أن التربة في أقصى كثافة جافة لها ومحتوى مائي مثالي على النحو المحدد من (AASHTO T180). تُستخدم التربة A-1-a و A-1-b فقط كطبقات للأساس.</td></tr>
<tr><td>أقصى كثافة جافة</td><td rowspan="4">يمكن تقديرها باستخدام المدخلات التالية: التدرج، ومؤشر اللدونة، وحد السائل (الجزأين ١-٣ و ٢-٣)</td></tr>
<tr><td>محتوى الرطوبة الأمثل</td></tr>
<tr><td>الوزن النوعي</td></tr>
<tr><td>الموصلية الهيدروليكية المشبعة</td></tr>
<tr><td>معلمات منحنى خصائص المياه والتربة</td><td>اخترها بناءً على فئة مواد الركام/القاعدة الترابية</td></tr>
</table>

فيما يلي ملخصًا لمعلمات المدخلات والقيم الموصى بها للطبقات غير المترابطة والأساسات:

- التدرج: راجع الجزء (٣-١) للتعرف على تدرج القاعدة الترابية والجزء (٣-٢) للتعرف على تدرج الركام غير المقيد الذي يشكل طبقة الأساس الحبيبي وطبقة ما تحت الأساس الحبيبية. ويمكن قياس تدرج الركام أو تربة جسر الطريق غير المترابطة وفقًا للمواصفة (AASHTO T88).
- حدود أتيربيرج: يمكن قياس حد السيولة وفقًا للمواصفة (AASHTO T89)، بينما يُحدد كل من حد اللدونة ومؤشر اللدونة وفقًا للمواصفة (AASHTO T90). راجع الجزئين (٣-١ و ٣-٢).
- الكثافة الجافة: قيم المدخلات الموصى بها للمواد الجديدة هي أقصى كثافة جافة تحددها مواصفات المواد باستخدام جهد الدمك المحدد للمشروع أو متوسط الكثافة الجافة المُقاسة في مشاريع الإنشاء السابقة لمواد مماثلة (راجع الجزئين ٣-١ و ٣-٢).
- محتوى الرطوبة: قيم المدخلات الموصى بها للمواد الجديدة هي إما محتوى الرطوبة الأمثل باستخدام جهد الدمك المحدد للمشروع (راجع الجزئين ٣-١ و ٣-٢) أو متوسط محتوى الرطوبة المُقاس في مشاريع الإنشاء السابقة لمواد مماثلة.
- نسبة بواسون: استخدم القيم الافتراضية العامة لطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) ما لم يكن لدى المصمم بيانات اختبار ناتجة من استخدام قيم مختلفة.
- معامل المرونة: استخدم مدخلات المستويين ٢ و ٣ للمواد الجديدة ما لم يكن لدى الجهة مكتبة لنتائج الاختبار. وتتضمن خواص المواد اللازمة لمدخلات المستويين ٢ و ٣ التدرج والتصنيف وحدود أتيربيرج ومحتوى الرطوبة والكثافة الجافة. ويمكن -أيضًا- تقدير معامل المرونة للطبقات غير المترابطة والأساسات من خلال اختبار نسبة تحمل كاليفورنيا (AASHTO T193) أو اختبار قيمة-R (AASHTO T190). وإذا ما اشتق معامل المرونة من اختبارات القوة هذه للمستوى ٢ للمدخلات، فينبغي استخدام الكثافة الجافة والمحتوى المائي المرتبط باختبارات القوة هذه لتوصيف التربة.

إذا كانت اختبارات معامل المرونة متاحة في مكتبة لمعلومات وبيانات المواد، فيمكن للمصمم استخدام متوسط القيمة للمواد الموجودة في الموقع. ويمكن تقدير معامل المرونة بناءً على حالات الإجهاد المكافئة. وقيم معامل المستوى ٣ المستخدمة لتقدير معامل المرونة الناتجة من اختبارات التصنيف تمثل محتوى الرطوبة الأمثل وأقصى كثافة جافة (راجع جدول ٥-٢٠) وستحتاج هذه القيم الافتراضية إلى تعديل إذا انحرفت الطبقة الموجودة بالموقع عن محتوى الرطوبة الأمثل وأقصى وزن للوحدة الجافة، على النحو المُعرف في المواصفة (AASHTO T180) في وقت الإنشاء. ويمكن إجراء تعديلات لمحتويات الرطوبة الأقل أو الأعلى والكثافات الجافة باستخدام معادلات الانحدار المشتقة من نتائج اختبار معامل المرونة لأداء الرصف على المدى الطويل (LTPP).

- الموصلية الهيدروليكية المشبعة: تُستخدم المواصفة (AASHTO T215) لقياس الموصلية الهيدروليكية المشبعة للطبقات الجديدة والقائمة غير المترابطة. ولكن جميع أعمال المعايرة المكتملة للإصدار ١,٠ من البرنامج الحاسوبي قد اكتملت باستخدام القيم الافتراضية العامة لطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG). ويُوصى باستخدام هذه القيم الافتراضية.
- معلمات منحنى خصائص المياه والتربة: بالنسبة للطبقات غير المترابطة الجديدة والقائمة، تُستخدم مواصفات اختبار (AASHTO) لقياس معلمات المدخلات هذه من أجل التنبؤ بالتغير في محتوى الرطوبة للطبقات غير المترابطة بمرور الوقت. ومع ذلك، فقد انتهي من المعايرة العامة باستخدام القيم الافتراضية العامة لطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG). ويُوصى باستخدام هذه القيم الافتراضية (راجع الجدول ٥-١٩).

٥-٣-٨ طريقة التصميم الإنشائي:

٥-٣-٨-١ بنود عامة:

يمكن تلخيص هذه الطريقة في الخطوات التالية:

١- اختر المقطع العرضي للرصف التجريبي (افترض سُمك الطبقة).
٢- اختر القيم الحدية (العتبة) لمعايير الأداء.
٣- اختر مستوى الموثوقية.
٤- اختر مستوى المدخلات الهرمي.
٥- حدد عوامل مرور الشاحنات.
٦- حدد المدخلات المناخية.
٧- حدد مدخلات تربة القاعدة الترابية.
٨- حدد خواص المواد (طبقات خلطة الأسفلت الساخن والطبقات الحبيبية غير المترابطة).
٩- قم بتشغيل البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED).
١٠- قيّم النتائج من حيث معايير الأداء.
١١- إذا استوفيت معايير الأداء، تكون عملية التصميم قد اكتملت. ,إذا لم تستوفى معايير الأداء، فارجع إلى الخطوة ١.

يعتمد تصميم وتحليل التصميم التجريبي على تراكم التلفيات كدالة في المناخ وأحمال المرور بمرور الوقت. وتعتمد منهجية طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) على نهج التلفيات التزايدية. وتُقدر العيوب أو التلفيات وتجميعها لكل فترة تحليل. ويُعرَّف الفاصل الزمني للتحليل بمدة شهر واحد على أنه الوحدة الأساسية لتقدير التلفيات التزايدية.

تسمح مستويات المدخلات الهرمية للمستخدم بالبدء في استخدام هذه الطريقة على المستوى الأساسي باستثمار أولي قليل. ويقدم الجدول (٥-٢١) قائمة عامة بمستويات المدخلات النموذجية المستخدمة في جهود إعادة المعايرة لمساعدة المستخدم في الحكم على قابلية تطبيق شروط الخطأ المعياري على التصميم التجريبي. ويقدم الجدول (٥-٢٢) مستويات المدخلات المنسقة مع تصنيف الطريق للجزء الفرعي (٥-١-١) ويوصى باعتماد الجدول (٥-١) في المملكة العربية السعودية.

الجدول (٥–٢١) مستويات المدخلات النموذجية المستخدمة في المعايرة العامة لنماذج البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED) والدوال التحويلية (AASHTO, 2020).

مجموعة المدخلات		معلمة المدخلات	مستوى مدخلات إعادة المعايرة المستخدم
مرور الشاحنات		توزيعات الحمل المحوري (أحادي- ثنائي- ثلاثي)	المستوى ١
توزيع الحجم المروري للشاحنات			المستوى ١
توزيع الشاحنات على المسارات والاتجاهات			المستوى ١
ضغط الهواء في الإطارات			المستوى ٣، افتراضي
تكوين المحاور، تباعد الإطارات			المستوى ٣، افتراضي
تمايل (ترنح) الشاحنة			المستوى ٣، افتراضي
المناخ		درجة الحرارة وسرعة الرياح والغطاء السحابي وتساقط الأمطار والرطوبة النسبية	المستوى ١، محطات الارصاد الجوية
خواص المواد	**الطبقات غير المترابطة والقاعدة الترابية**	المعامل المرن- جميع الطبقات غير المترابطة	المستوى ١، الحساب الراجع
		التصنيف والخواص الحجمية	المستوى ١
		علاقات الرطوبة والكثافة	المستوى ١
		علاقات خصائص التربة والمياه	المستوى ٣، افتراضية
		التوصيل الهيدروليكي المشبع	المستوى ٣، افتراضية
	الخرسانة الأسفلتية	المعامل الديناميكي للخرسانة الأسفلتية	المستوى ٣، افتراضية
		الامتثال للزحف ومقاومة الشد غير المباشر للخرسانة الأسفلتية	المستوى ١ و ٢ و ٣
		الخواص الحجمية	المستوى ١
		معامل التمدد الحراري للخرسانة الأسفلتية	المستوى ٣، افتراضي
جميع المواد		وزن الوحدة	المستوى ١
نسبة بواسون			المستوى ٣، افتراضي
الخواص الحرارية الأخرى - القابلية للتوصيل والسعة الحرارية والقابلية للامتصاص			المستوى ٣، افتراضي

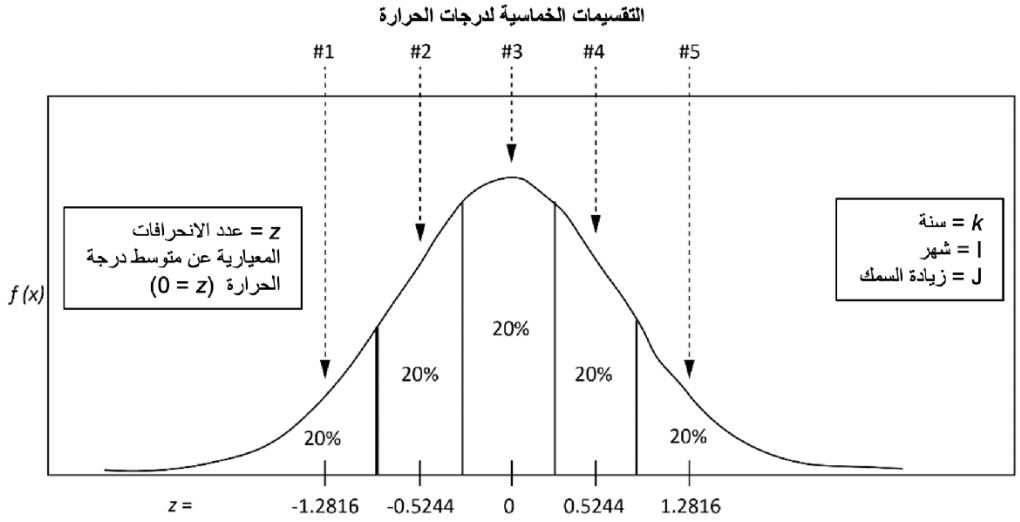
الجدول (٥–٢٢) مستويات المدخلات الموصى بها لتصنيف الطرق في المملكة العربية السعودية.

مجموعة المدخلات		عنصر المدخلات	فئة التصنيف			
			M	H	VH	EH
مرور الشاحنات		توزيعات الحمل المحوري (أحادي- ثنائي- ثلاثي)	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١
توزيع الحجم المروري للشاحنات			المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١
توزيع الشاحنات على المسارات والاتجاهات			المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١
ضغط الهواء في الإطارات			المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣
تكوين المحور، تباعد الإطارات			المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣
تمايل (ترنح) الشاحنة			المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣
المناخ		درجة الحرارة وسرعة الرياح والغطاء السحابي وتساقط الأمطار والرطوبة النسبية	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١
خواص المواد	**الطبقات غير المترابطة والقاعدة الترابية**	المعامل المرن- جميع الطبقات غير المترابطة	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١
		التصنيف والخواص الحجمية	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١
		علاقات الرطوبة والكثافة	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١
		علاقات خصائص التربة والمياه	المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣
		التوصيل الهيدروليكي المشبع	المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣
	الخرسانة الأسفلتية	المعامل الديناميكي للخرسانة الأسفلتية	المستوى ٣	المستوى ٢	المستوى ١	المستوى ١
		التوافق مع زحف الخرسانة الأسفلتية ومقاومة الشد غير المباشر	المستوى ٣	المستوى ٢	المستوى ١	المستوى ١
		الخواص الحجمية	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١
		معامل التمدد الحراري للخرسانة الأسفلتية	المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣
جميع المواد		وزن الوحدة	المستوى ٣	المستوى ١	المستوى ١	المستوى ١
نسبة بواسون			المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣	المستوى ٣

وفيما يلي ملخص للمنهجية والنماذج الرياضية المستخدمة للتنبؤ بكل رصف مرن ومؤشر أداء طبقة التكسية من الخرسانة الأسفلتية.

تقسم طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) الطبقات الإنشائية والأساسات للتصميم التجريبي إلى طبقات فرعية. يعتمد سُمك الطبقات الفرعية على نوع المادة وسُمك الطبقة الفعلي والعمق داخل بنية الرصف. وتُحسب استجابات الرصف الحرجة في كل طبقة فرعية باستخدام برنامج نظرية الطبقة المرنة المعروف باسم (JULEA)، والمضمن في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED). تستخدم طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) على مدى واسع النموذج المناخي المتكامل المُحسن (EICM) لتعديل قيم معامل طبقة الرصف مع درجة الحرارة والرطوبة. يحسب النموذج المناخي المتكامل المُحسن (EICM) ظروف درجة الحرارة والرطوبة على طول الهيكل الإنشائي للرصف لكل ساعة. ويفترض أن يكون التوزيع التكراري لدرجات حرارة الخرسانة الأسفلتية باستخدام النموذج المناخي المتكامل المعزز (EICM) موزعًا توزيعًا طبيعيًا. وتُدمج درجات الحرارة في كل طبقة فرعية من الخرسانة الأسفلتية في خمسة أخماس، يمثل كل خُمْس (٢٠٪) من التوزيع التكراري لكل شهر من فترة التحليل للعيوب ذات الصلة بالحمل (الشكل ٥-١٣). يتحقق هذا الأمر بحساب درجات حرارة الرصف المناظرة للتكرارات المتراكمة التي تبلغ ١٠ و ٣٠ و ٥٠ و ٧٠ و ٩٠ بالمائة خلال شهر محدد. يُستخدم

متوسط درجة الحرارة لكل خُمْس من الطبقة الفرعية لكل شهر لتحديد المعامل الديناميكي لتلك الطبقة الفرعية. ويفترض أن يكون مرور الشاحنات متساويًا داخل كل خُمس من أخماس درجات الحرارة. وبالتالي، فإن طريقة الرصف المرن لا تربط أحجام مرور الشاحنات لكل ساعة مباشرةً بدرجات الحرارة في الساعة.



الشكل (٥–١٣) رسم بياني لأخماس درجات الحرارة الخمس المستخدمة في طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) لتحديد خواص خلطة الخرسانة الأسفلتية لحالات العيوب المتعلقة بالحمل (AASHTO, 2020).

يُستخدم المعامل الديناميكي لحساب الانفعالات الأفقية والرأسية عند أعماق حرجة على شبكة لتحديد الحد الأقصى للتشوه الدائم في كل طبقة وموقع أقصى تلف كلل في طبقات الخرسانة الأسفلتية. وبالنسبة للشقوق المستعرضة (الشقوق غير المتعلقة بالحمل)، يحسب النموذج المناخي المتكامل المُحسن (EICM) درجات حرارة الخرسانة الأسفلتية لكل ساعة، ويستخدم درجات الحرارة لكل ساعة لتقييم خواص الخرسانة الأسفلتية (الامتثال للزحف وقوة الشد غير المباشر) لحساب إجهاد الشد عبر الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية.
كما يحسب النموذج المناخي المتكامل المُحسن (EICM) -أيضًا- درجات الحرارة داخل كل طبقة فرعية غير مترابطة، ويحدد الأشهر التي تتجمد فيها أي طبقة فرعية. وبعد ذلك، يُزاد المعامل المرن للطبقة الفرعية المجمدة أثناء فترة التجمد وتخفيضه أثناء فترة الذوبان.
ويحسب النموذج المناخي المتكامل المُحسن (EICM) -أيضًا- متوسط محتوى الرطوبة في الطبقات غير المترابطة لكل شهر من فترة التحليل. ويستخدم متوسط محتوى الرطوبة الشهري بالنسبة لمحتوى الرطوبة الأمثل لتعديل معامل المرونة لكل طبقة فرعية غير مترابطة لكل شهر طوال فترة التحليل. كما تُستخدم استجابات الرصف الحرجة لحساب كل من تلف الكلل والتشقق الحراري والتشوه الدائم.

٥-٣-٨-٢ عمق التخدد:

تشوه السطح الذي في شكل تخدد يحدث بسبب تشوه لدن أو رأسي دائم في الخرسانة الأسفلتية والطبقات غير المترابطة وتربة الأساسات. يعتمد النهج المستخدم في طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) على حسابات التشوه التزايدي أو التخدد داخل كل طبقة فرعية. بمعنى آخر، يُقدّر التخدد لكل موسم فرعي بمنتصف عمق كل طبقة فرعية داخل الهيكل الإنشائي للرصف. التشوه اللدن لموسم معين هو مجموع التشوهات الرأسية اللدنة داخل كل طبقة. يستخدم نموذج حساب التشوه الكلي الدائم الانفعال الرأسي اللدن في ظروف رصف محددة للعدد الإجمالي للشاحنات ضمن هذه الظروف. تختلف الظروف من شهر إلى آخر، لذا من الضروري استخدام نهج خاص، يعرف باسم "التصلد الانفعالي"، لدمج تلك الانفعالات الرأسية المرنة خلال كل شهر في نظام فرعي للتشوه التراكمي.

يُقاس معدل، أو تراكم، التشوه اللدن في المعمل باستخدام اختبارات ثلاثية المحاور(triaxial) للتشوه الدائم للحمل المتكرر لكل من الخرسانة الأسفلتية والمواد غير المترابطة. ثم تُعدل العلاقة المشتقة من المعمل لتتناسب مع عمق التخدد المقاس على الطريق. لجميع خلطات الخرسانة الأسفلتية، توضح المعادلة (٥-١٩) الصيغة المُعيارية ميدانيًا لطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) وفقًا للعلاقة المشتقة معمليًا من اختبارات التشوه الدائم للحمل المتكرر.

$$\Delta_{p(AC)} = \varepsilon_{p(AC)} \times h_{AC} = \beta_{1r} \times k_z \times \varepsilon_{r(AC)} \times 10^{k_{1r}} \times n^{k_{3r}\beta_{3r}} \times T^{k_{2r}\beta_{2r}}$$ **المعادلة (٥-١٩)**

حيث:

$\Delta_{p(AC)}$ = تشوه رأسي تراكمي دائم أو لدن في طبقة الخرسانة الأسفلتية/الطبقة الفرعية، بوصة.

$\varepsilon_{p(AC)}$ = انفعال محوري تراكمي دائم أو لدن في طبقة الخرسانة الأسفلتية/الطبقة الفرعية، بوصة/بوصة.

$\varepsilon_{r(AC)}$ = انفعال مرن محسوب بواسطة نموذج الاستجابة الإنشائية عند منتصف عمق كل طبقة خرسانة أسفلتية فرعية، بوصة/بوصة.

$h_{(AC)}$ = سمك طبقة الخرسانة الأسفلتية/الطبقة الفرعية، بوصة.

n = عدد مرات تطبيق حمل المحور.

T = درجة حرارة الخلطة أو الرصف، درجة فهرنهايت.

k_z = معامل حصر العمق.

$k_{1r,2r,3r}$ = المعاملات العامة المشتقة معمليًا لخلطات الخرسانة الأسفلتية النظيفة ذات التدرج الكثيف (k_{1r} =٢,٤٥٤٥، k_{2r} = ٣,٠١، k_{3r} =٠,٢٢)

$\beta_{1r,2r,3r}$ = المعايرة المحلية أو معايرة الخلطة أو ثوابت الإزاحة الحقلية، للمعايرة العامة؛ هذه الثوابت هي: β_{1r} = ٠,٤٠، β_{2r} = ٠,٥٢، β_{3r} = ١,٣٦.

المعادلة (٥-٢٠)

$$\mathbf{k_z = (C_1 + C_2 \times D) \times 0.328196^D}$$

المعادلة (٥-٢١)

$$\boldsymbol{C_1 = -0.1039 \times (H_{AC})^2 + 2.4868 \times H_{AC} - 17.342}$$

المعادلة (٥-٢٢)

$$\boldsymbol{C_2 = 0.0172 \times (H_{AC})^2 - 1.7331 \times H_{AC} + 27.428}$$

حيث:

D = العمق تحت السطح، بوصة.

H_{AC} = إجمالي سمك الخرسانة الأسفلتية، بوصة.

تستخدم معادلة حساب التشوه اللدن الانفعال الرأسي اللدن في ظروف رصف محددة بالنسبة للعدد الإجمالي للشاحنات ضمن هذه الظروف. يُقاس معدل التشوه اللدن التراكمي في المعمل باستخدام اختبارات ثلاثية المحاور للتشوه الدائم للحمل المتكرر للخرسانة الأسفلتية. افترضت مجموعة واحدة من معاملات النموذج في الأصل لجميع طبقات الخرسانة الأسفلتية داخل نفس الهيكل الإنشائي للرصف (المعادلة ٥-١٩). بُنيت الفرضية على أن الاختلاف في الوحدات الديناميكية بين طبقات الخرسانة الأسفلتية المختلفة من شأنه أن يفسر بشكل صحيح أي اختلاف في التشوهات اللدنة. ومع ذلك، يمكن استخدام معاملات الطبقة الخاصة بالخلطة المقاسة في المعمل للتنبؤ بعمق التخدد الكلي في طبقات الخرسانة الأسفلتية. على هذا النحو، فُصلت معاملات الانفعال البلاستيكي المشتقة من المعمل عن المعاملات المعدلة ميدانيًا.

توضح المعادلة (٥-٢٣) المعادلة الرياضية المعايرة ميدانيًا المستخدمة لحساب التشوه الرأسي اللدن داخل جميع طبقات الرصف الفرعية غير المترابطة وتربة الأساسات أو جسر الطريق.

المعادلة (٥-٢٣)

$$\boldsymbol{\Delta_{p(soil)} = \beta_{s1} \times k_{s1} \times \varepsilon_v \times h_{soil} \times \left(\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_r}\right) \times e^{-\left(\frac{\rho}{n}\right)^{\beta}}}$$

حيث:

$\Delta_{p(soil)}$ = التشوه الدائم أو اللدن للطبقة/الطبقة الفرعية، بوصة.

n = عدد مرات تطبيق حمل المحور.

ε_o = قاطع الإحداثي الصادي المحدد من الاختبارات المعملية للتشوه الدائم للحمل المتكرر، بوصة/ بوصة،

ε_r = الانفعال المرن المفروض في الاختبار المعملي للحصول على خواص المادة (ε_o ،β ،ρ).

ε_v = متوسط الانفعال الرأسي المرن في الطبقة/الطبقة الفرعية ويحسب باستخدام نموذج الاستجابة الإنشائية، بوصة/ بوصة.

h_{soil} = سُمك الطبقة/ الطبقة الفرعية غير المترابطة، بوصة.

k_{s1} = معاملات النموذج العالمي التي تعتمد على المواد أو التربة؛ (k_{s1} =٠,٩٦٥) للمواد الحبيبية للأساس الركامي، و ٠,٩٦٥ للتربة الحبيبية الخشنة، و ٠,٦٣٥ للتربة الرملية، و٠,٦٧٥ للتربة الحبيبية الناعمة.

β_{s1} = ثابت المعايرة المحلي للتخدد في الطبقات غير المترابطة؛ وحُدد ثابت المعايرة المحلي على أنه ١,٠ لجميع المواد غير المترابطة من أجل جهود المعايرة العامة.

المعادلة (٥-٢٤)

$$log\beta = -0.61119 - 0.017638 \times W_c$$

المعادلة (٥-٢٥)

$$\rho = 10^9 \times \left\{ \frac{C_o}{[1-(10^9)^\beta]} \right\}^{\frac{1}{\beta}}$$

المعادلة (٥-٢٦)

$$C_o = Ln\left(\frac{a_1 \times M_R^{b1}}{a_9 \times M_R^{b9}}\right) = 0.0075$$

حيث:

W_c = محتوى الماء، ٪.

M_R = معامل المرونة للطبقة/الطبقة الفرعية غير المترابطة ، رطل لكل بوصة مربعة.

$\alpha_{1,9}$ = ثوابت الانحدار؛ α_1 = ٠,١٥ و α_9 = ٢٠,٠.

$b_{1,9}$ = ثوابت الانحدار؛ b_1 = ٠,٠ و b_9 = ٠,٠.

٥-٣-٨-٣ التشققات المرتبطة بالحمل:

هناك نوعان من التشققات المرتبطة بالحمل يمكن التنبؤ بهما باستخدام طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) لطبقات الخرسانة الأسفلتية، وهما: الشقوق التمساحية والشقوق الطولية. تفترض طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) أن الشقوق التمساحية، أو شقوق المساحة، تبدأ عند قاعدة طبقات الخرسانة الأسفلتية، ثم تنتقل إلى السطح مع استمرار مرور الشاحنات، بينما تفترض أن الشقوق الطولية تبدأ من السطح. توضح المعادلة (٥-٢٧) العدد المسموح به من عدد مرات تطبيق الأحمال المحورية اللازمة للتنبؤ بمؤشر التلفيات التزايدية لكلا نوعي التشققات المرتبطة بالأحمال (التمساحية والطولية).

المعادلة (٥-٢٧)

$$N_{f-AC} = k_{f1} \times C \times C_H \times \beta_{f1} \times (\varepsilon_t)^{k_{f2} \times \beta_{f2}} \times (E_{AC})^{k_{f3} \times \beta_{f3}}$$

حيث:

N_{f-AC} = هو العدد المسموح به من مرات تطبيق الأحمال المحورية على الرصفية المرنة وأغطية (overlays) الخرسانة الأسفلتية.

ε_t = انفعال الشد عند المواقع الحرجة، ويُحسب باستخدام نموذج الاستجابة الإنشائية، بوصة/بوصة.

E_{AC} = المعامل الديناميكي للخرسانة الأسفلتية المُقاس تحت الضغط، رطل لكل بوصة مربعة.

k_{f1}, k_{f2}, k_{f3} = المعاملات العامة المشتقة معمليًا لخلطات الخرسانة الأسفلتية النظيفة ذات التدرج الكثيف (k_{f1} =٣,٧٥، k_{f2} = ٢,٨٧، k_{f3} =١,٤٦).

β_{f1}, β_{f2}, β_{f3} = ثوابت الإزاحة أو التعديل الحقلية، المحلية أو الخاصة بالخلطة؛ لجهود المعايرة العامة، وهذه الثوابت هي: β_{f1} ويعتمد على سمك طبقة الخرسانة الأسفلتية، و β_{f2} ويساوي ١,٣٨ و β_{f3} ويساوي ٠,٨٨.

بالنسبة لطبقات الخرسانة الأسفلتية التي يقل سمكها عن ١٢٧ مم (٥ بوصة): β_{f1} =٠,٠٢٠٥٤

بالنسبة لطبقات الخرسانة الأسفلتية التي يتراوح سمكها بين ١٢٧ إلى ٣٠٠ مم (٥ - ١٢ بوصة): فإن $\beta_{f1} = 5.014 \times (H_{AC})^{-3.416}$.

بالنسبة لطبقات الخرسانة الأسفلتية التي يتجاوز سمكها ٣٠٠ مم (١٢ بوصة): β_{f1} = ٠,٠٠١٠٣٢.

المعادلة (٥-٢٨)

$$C = 10^{M}$$

المعادلة (٥-٢٩)

$$M = 4.84 \times \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69\right)$$

حيث:

H_{AC} = إجمالي سُمك طبقات الخرسانة الأسفلتية، بالبوصة.

V_{be} = محتوى الأسفلت الفعَّال بالحجم، ٪.

V_{α} = النسبة المئوية للفراغات الهوائية في خلطة الخرسانة الأسفلتية.

C_H = رمز تصحيح السُمك، ويعتمد على نوع التشقق.

بالنسبة للتشققات التمساحية أو الشقوق من الأسفل إلى الأعلى:

المعادلة (٥-٣٠)

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 \times H_{AC})}}}$$

بالنسبة للتشققات الطولية أو الشقوق من الأعلى إلى الأسفل:

المعادلة (٥-٣١)

$$C_H = \frac{1}{0.01 + \frac{1200}{1 + e^{(15.676 - 2.8186 \times H_{AC})}}}$$

تحسب طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) مؤشرات التلفيات التزايدية على نمط شبكي يمتد عبر طبقات الخرسانة الأسفلتية عند أعماق حرجة. يُحسب مؤشر التلفيات التزايدية (ΔDI) بقسمة العدد الفعلي للأحمال المحورية على العدد المسموح به من الأحمال المحورية (المُعرّف بالمعادلة ٥-١٥، ويُشار إليه باسم "فرضية مينر"، "Miner's hypothesis") بخطوات زمنية تزايدية محددة، وفترات الحمل المحوري لكل نوع من المحاور. يُحسب مؤشر التلفيات المتراكمة (DI) لكل موقع بجمع مؤشرات التلفيات المتزايدة بمرور الوقت، كما هو موضح في المعادلة (٥-٣٢).

$$DI = \sum(\Delta DI)_{j,m,l,p,T} = \sum\left(\frac{n}{N_{f-HMA}}\right)_{j,m,l,p,T}$$ **المعادلة (٥-٣٢)**

حيث:

n = العدد الفعلي لمرات تطبيق الأحمال المحورية على امتداد فترة زمنية محددة.

j = فترة الحمل المحوري.

m = نوع الحمل المحوري (أحادي - ترادفي - ثلاثي - رباعي).

l = نوع الشاحنة باستخدام مجموعات تصنيف الشاحنات المدرجة في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED).

p = شهر

T = وسيط درجة الحرارة لخمس فترات من درجات الحرارة أو الأخماس المستخدمة لتقسيم كل شهر، درجة فهرنهايت.

تُحسب مساحة التشققات التمساحية وأطوال التشققات الطولية من إجمالي التلفيات المتحققة بمرور الزمن (المعادلة ٥-٣١) باستخدام الدوال التحويلية المختلفة. المعادلة (٥-٣٣) هي العلاقة المستخدمة للتنبؤ بكمية التشققات التمساحية من حيث المساحة (FC_{bottom}).

$$FC_{bottom} = \left(\frac{1}{60}\right)\left(\frac{C_4}{1+e^{[C_1\times C_1^*+C_2\times C_2^*\times log(DI_{bottom}\times 100)]}}\right)$$ **المعادلة (٥-٣٣)**

حيث:

FC_{bottom}= مساحة التشققات التمساحية التي تبدأ عند قاعدة طبقات الخرسانة الأسفلتية، ٪ من إجمالي مساحة المسار.

DI_{bottom} = مؤشر التلفيات التراكمية عند قاعدة طبقات الخرسانة الأسفلتية.

$C_{1,2,4}$ = ثوابت انحدار الدالة التحويلية (C_4 = ٦,٠٠٠ و C_1 = ١,٠٠ و C_2 = ١,٠٠)

$$C_1^* = -2 \times C_2^*$$

$$C_2^* = -2.40874 - 39.748 \times (1 + H_{AC})^{-2.856}$$

المعادلة (٥-٣٤) هي العلاقة المستخدمة للتنبؤ بأطوال تشققات الكلل الطولية (FC_{top}).

$$FC_{top} = 10.56 \times \left\{\frac{C_4}{1+e^{[C_1-C_2\times log(DI_{top})]}}\right\}$$ **المعادلة (٥-٣٤)**

حيث:

FC_{top} = طول التشققات الطولية التي تبدأ أعلى طبقة الخرسانة الأسفلتية، قدم/ميل.

DI_{top} = مؤشر التلفيات التراكمية بالقرب من سطح طبقة الخرسانة الأسفلتية.

$C_{1,2,4}$ = ثوابت انحدار دالة النقل؛ C_1 = ٧,٠٠ و C_2 = ٣,٥ و C_4 = ١,٠٠٠.

تُستخدم معايير الأداء للتأكد من تحقيق تصميم الرصف لأداء مُرض على امتداد العمر التصميمي للمشروع. يختار المصمم قيم الإجهاد الحدية (العتبة) للحكم على مدى ملاءمة تصميم تجريبي ما. وينبغي أن تعبر تلك القيم الحدية للأداء عن سياسات الجهة، فيما يتعلق بظروف الرصف التي قد تتطلب بعض أعمال التأهيل الرئيسة أو إعادة الإنشاء. تشتمل تلك القيم الحدية على اعتبارات خواص المواد (مثل: التشققات الحرارية في الرصفيات المرنة، أو التشققات في الرصفيات الصلبة)، والعيوب الإنشائية (مثل: تشققات الكلل في

الرصفيات المرنة)، والعيوب الوظيفية مثل مؤشر الخشونة الدولي (IRI). يوصى بأن تُختار معايير تصميم العيوب ومؤشر الخشونة الدولي (IRI) من خلال تصور ظروف الرصف بمرور الوقت وتأثيرها على السلامة. وتشتمل الاعتبارات الأخرى على احتياجات الصيانة (مثل: عدد مرات إغلاق المسارات)، والجهود اللازمة لتجديد الرصف التي تقترب من ظروف نهاية عمرها، وإدراك أن المعايير موضوعة عند مستوى موثوقية للتصميم محدد (مثل: ٩٠٪).

يعرض الجدول (٥-٢٣) قيم الأداء التي تستخدمها إدارات الطرق، مع إدراك احتمالية تفاوت تلك القيم بين الجهات المختلفة، في ضوء ظروفهم الخاصة. يعرض الجدول (٥-٢٤) القيم الحدية (العتبة) لمعايير الأداء المقترح العمل بها في المملكة العربية السعودية.

الجدول (٥–٢٣) معايير التصميم أو القيم الحدية (العتبة) الموصى باستخدامها للحكم على مدى قبول التصميم التجريبي (AASHTO, 2020).

نوع الرصف	معايير الأداء	القيمة الحدية (العتبة) عند نهاية العمر التصميمي
رصف خرسانة أسفلتية	الشقوق التمساحية (الشقوق من أسفل إلى أعلى طبقة الخرسانة الأسفلتية):	طريق سريع ريفي: ١٠٪ من مساحة المسار طريق رئيس: ٢٠٪ من مساحة المسار طريق فرعي: ٣٥٪ من مساحة المسار
	إجمال عمق التخدد (تشوه دائم في مسار العجلات)	طريق سريع ريفي: ١٠ مم (٨\٣ بوصة) طريق رئيس: ١٢,٥ مم (٢\١ بوصة) طرق أخرى (أقل من ٧٢ كم/ساعة (أقل من ٤٥ ميل في الساعة)): ١٦ ملم (٨\٥ بوصة)
	طول الشقوق المستعرضة (الشقوق الحرارية):	طريق سريع ريفي: ٩٤,٥ م/كم (٥٠٠ قدم/ميل) طريق رئيس: ١٣٢ م/كم (٧٠٠ قدم/ميل) طريق فرعي: ١٣٢ م/كم (٧٠٠ قدم/ميل)
	IRI (النعومة)	طريق سريع ريفي: ٢,٥٣ م/كم (١٦٠ بوصة/ميل) طريق رئيس: ٣,١٦ م/كم (٢٠٠ بوصة/ميل) طريق فرعي: ٣,١٦ م/كم (٢٠٠ بوصة/ميل)

الجدول (٥–٢٤) القيم الحدية لمعايير الأداء المقترح العمل بها في المملكة العربية السعودية.

معايير الأداء	القيمة الحدية (العتبة) عند نهاية العمر التصميمي
التشقق التمساحي	الطرق السريعة والطرق شبه السريعة والطرق الصناعية: ١٠٪ من مساحة المسار الطرق الشريانية والطرق التجميعية: ٢٠٪ من مساحة المسار الطرق المحلية: ٣٥٪ من مساحة المسار
إجمالي عمق التخدد	الطرق السريعة والطرق شبه السريعة والطرق الصناعية: ١٠ مم (٨\٣ بوصة) الطرق الشريانية والطرق التجميعية: ١٢,٥ مم (٢\١ بوصة) الطرق المحلية: ١٦ بوصة (٨\٥ بوصة)
طول الشقوق المستعرضة	الطرق السريعة والطرق شبه السريعة والطرق الصناعية: ٩٤,٥ م/كم (٥٠٠ قدم/ميل) الطرق الشريانية والطرق التجميعية: ١٣٢ م/كم (٧٠٠ قدم/ميل) الطرق الفرعية: ١٣٢ م/كم (٧٠٠ قدم/ميل)
مؤشر الخشونة الدولي (IRI)	الطرق السريعة والطرق شبه السريعة والطرق الصناعية: ٢,٥٣ م/كم (١٦٠ بوصة/ميل) الطرق الشريانية والطرق التجميعية: ٣,١٦ م/كم (٢٠٠ بوصة/ميل) الطرق المحلية: ٣,١٦ م/كم (٢٠٠ بوصة/ميل)

يمكن للمصمم توصيف المستوى المنشود من الموثوقية لكل نوع من العيوب والنعومة. ومن الممكن أن يعتمد مستوى موثوقية التصميم على الأثر المترتب على الوصول إلى حالة نهاية صلاحية الاستخدام قبل انتهاء العمر التصميمي. ويمكن أن تتفاوت مستويات الموثوقية المختارة بتغير نوع العيوب ومؤشر الخشونة الدولي (IRI)، أو تظل ثابتة لكل منهما. يمكن اختيار الموثوقية في ضوء نوع العيوب، والخطأ المعياري لنموذج التنبؤ بالعيوب. وفي جميع الحالات، ينبغي الاستفادة من حكم وخبرة المهندسين، عند اختيار قيمة موثوقية محددة. ونظرًا لما قد يكون للموثوقية من تأثير بالغ على التنبؤات الخاصة بالرصف، يُنصح بالتحدث مع جميع أصحاب المصلحة واستشارتهم قبل اختيار أي قيمة. تُعرف موثوقية التصميم (R) بأنها احتمالية (P) أن يكون العيب المتوقع أقل من المستوى الحرج على امتداد العمر التصميمي.

المعادلة (٥-٣٥) $$R = P\,[\,Distress\ over\ Design\ Period < Critical\ Distress\ Level\,]$$

يمكن اختيار موثوقية التصميم بالتوازن مع معايير الأداء المنشودة. يعرض الجدول (٥-٢٥) القيم التي يُعتقد بأنها متوازنة مع معايير الأداء الواردة في الجدول (٥-٢٣)، والمقترحة للاستخدام في التصميم. يمكن تبني القيم الواردة في الجدول (٥-٧) للاستخدام في المملكة العربية السعودية.

الجدول (٥–٢٥) الحد الأدنى من المستويات المقترحة للموثوقية لمختلف التصنيفات الوظيفية للطرق (AASHTO, 2020).

التصنيف الوظيفي	مستوى الموثوقية	
	حضري	ريفي
طرق سريعة	٩٥	٩٥
طرق شريانية رئيسة	٩٠	٨٥
طرق تجميعية	٨٠	٧٥
طرق محلية	٧٠	٧٠

٥-٣-٩ منهجية المعايرة المحلية لطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) :

تمت معايرة البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) باستخدام بيانات مستمدة من مجموعة كبيرة من مقاطع الطرق الفعلية الموزعة عبر الولايات المتحدة الأمريكية وكندا. علمًا بأن هذا البرنامج يتيح للمصمم "ضبط وتعديل" المعايرة العامة أو عوامل تعديل الإزاحة الحقلية و / أو استخدام ثوابت الانحدار الخاصة بجهة محددة فيما يخص "دوال تلفيات العيوب" المفردة استنادًا إلى مجموعات بيانات محلية وإقليمية يستحدثها المستخدم.

ويمكن اتباع منهجية معايرة محلية لتنبؤات أداء طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) استنادًا إلى دليل (AASHTO) بهدف اعتماد البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) مع الظروف المحلية على النحو التالي:

- الخطوة ١: اختر مقاطع الرصف النموذجية في سائر أنحاء المملكة.
- الخطوة ٢: حدد المصادر المتاحة لجمع بيانات المدخلات (المرور والمواد والبيئة) وحدد المستوى المرغوب للحصول على كل من هذه البيانات.
- الخطوة ٣: أعد قاعدة بيانات تتضمن مدخلات طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) المستقاة من المصادر المتاحة مثل قواعد بيانات الرصف لدى الهيئة العامة للطرق (RGA) ووزارة الشؤون البلدية والقروية والإسكان (أمانات المدن والبلديات)، وقواعد بيانات الرصف، ونظام إدارة الرصف (PMS)، وسجلات اختبارات المواد، وقاعدة بيانات التصميم، وتقارير المشاريع البحثية ذات الصلة بأداء الرصف.مطلوب إجراء اختبارات معملية واختبارات محاكاة لحركة المرور الكثيفة لجوانب الكلل والتخدد والمتانة.
- الخطوة ٤: طور قاعدة بيانات تشتمل على بيانات الأداء المخصصة لمقاطع رصف مختارة من مصادر ذات صلة.
- الخطوة ٥: تقييم التحيز المحلي من عوامل المعايرة الوطنية.
- الخطوة ٦: تحديد عوامل المعايرة المحلية (تحليل الحساسية وتعظيم عوامل المعايرة).
- الخطوة ٧: تحديد مدى ملاءمة عوامل المعايرة المحلية.

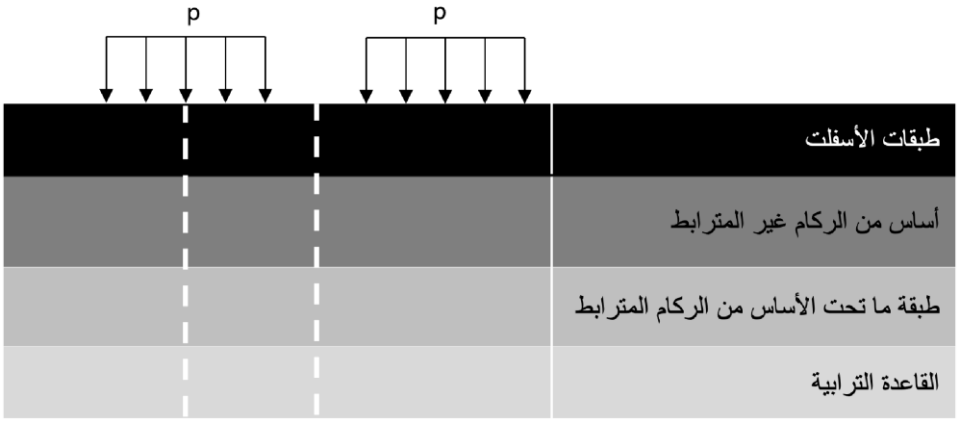
ويمكن تعديل الطريقة الواردة أعلاه وفق الحاجة.

٥-٤ تصميم الرصفيات ذات المقطع العرضي الثابت:

٥-٤-١ نموذج الرصف:

لأغراض التحليل، أُستخدم "نموذج استجابة الرصف" بهدف تقدير مستويات الانفعال في مواقع حرجة باستخدام نظرية المرونة متعددة الطبقات. بالنسبة للرصفيات المرنة، تكون المواقع الحرجة في أسفل الطبقات الأسفلتية (انفعال الشد: ε_r) وفي الجزء العلوي من الطبقة العليا (انفعال الانضغاط: ε_z)، حسبما هو موضح في الشكل (٥-١٤).

بالنسبة للحالة التي يكون فيها الحمل المرجعي مكونًا من حمل محور أحادي مزدوج العجلات (٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل))، يوجد مقطعان رأسيان حسابيان، أحدهما يخص محور الدائرة التي تحدد أحد الحملين والآخر يخص المحور المركزي لتماثل العجلات المزدوجة. ويُقدر العدد المسموح للأحمال المكافئة أحادية المحور البالغة ٨,١٦ طنًا (١٨ ألف رطل)، وذلك استنادًا إلى القيم القصوى لكل من انفعال الشد (ε_r) وانفعال الانضغاط (ε_z).



الشكل (٥–١٤) نموذج الرصف للتحليل الإنشائي.

٥-٤-٢ العمر التصميمي:

تُصمم وتُحلل الرصفيات المرنة لفترة أداء ٢٠ عامًا.

٥-٤-٣ الأحمال المرورية:

يُعبر عن الأحمال المرورية بعدد الأحمال المكافئة أحادية المحور بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل) التي ستسير على المسار التصميمي للرصف على مدار العمر التصميمي. كما يؤخذ في الاعتبار فئات المرور ومدى مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) الواردة في الجدول (٥-١). عندما لا تتوفر بيانات أحمال المحاور، فإنه يمكن تقدير مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بناءً على الشكل (و-٨) والشكل (و-٢) في الملحق (و).

٥-٤-٤ خواص المواد:

من أجل وصف خصائص قوة التربة فإن نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) تؤخذ في الحسبان. وقد أُجري التحليل لثلاثة أنواع من التربة: ١) جودة ممتازة بنسبة تحمل كاليفورنيا أكبر من أو تساوي ٢٠٪، و٢) جودة جيدة جدًا بنسبة تحمل كاليفورنيا تتراوح بين ١٠ و ٢٠٪، و ٣) جودة متوسطة بنسبة تحمل كاليفورنيا تتراوح بين ٥ و ٩٪. بالنسبة لقيم نسبة تحمل كاليفورنيا المنخفضة، يُنصح باستبدال التربة أو تحسينها، وذلك باستخدام تقنيات تثبيت التربة أو الحفر أو إعادة الدمك أو الاستخراج والاستبدال، أو غيرها من التدابير المعتمدة لزيادة قوة التربة. ويمكن استخدام المعادلة (٥-٥) لتحديد معامل المرونة.

وقد أُشتق معامل الطبقات غير المترابطة (طبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس) استنادًا إلى معامل التربة. أجرى كل هيوكيلوم وفوستر (Heukelom و Foster) (عام ١٩٦٠) تحليلات خطية مرنة للرصفيات مستخدمَين سُمك طبقة نموذجية مدموكة. وقد استنتجا أن نسبة معامل طبقة أساس غير مترابطة (E_i) إلى المعامل الخاص بالتربة الأساسية (E_{i+1}) كانت لا تزيد عن قيمة ٢,٥، أي

($E_i / E_{i+1} < 2.5$)، وخلاف ذلك فمن المحتمل أن تتطور إجهادات شد أفقية في أسفل الطبقة (i). وستؤدي تلك الإجهادات في ظل التحميل المتكرر إلى تفكُّك الطبقة العلوية غير المترابطة إلى أن تتضاءل صلابتها إلى قيمة محدودة لا يحدث عندها أي إجهادات للشد. لذلك، يُستخدم مفهوم النسبة المعيارية، الوارد في المعادلة التالية، كدليل لتحديد معامل الطبقة غير المترابطة.

$$E_i/E_{i+1} = 0.2 \times h_i^{0.45} \text{ and } 2 \le E_i/E_{i+1} \le 4$$ **المعادلة (٥-٣٦)**

حيث:

h_i = ارتفاع طبقة التغطية (overlying) بالمليمتر.

يعد المعامل الديناميكي لطبقة الخرسانة الأسمنتية بمثابة معلمة مدخلات أساسية ليس فقط لتحليل نظرية مرونة الطبقات (LET) ولكن أيضًا لقانون الكلل.

ومن أجل تصميم مقطع عرضي للرصف القائم، يفترض أن المعامل الديناميكي للخرسانة الأسمنتية يساوي ٣،٠٠٠ ميجا باسكال عند درجة حرارة تصميمية تبلغ ٣٢ درجة مئوية.

٥-٤-٥ طريقة التصميم الإنشائي:

تعرض الأشكال من الشكل ٥-١٥) إلى الشكل (٥-٢٠) المقاطع العرضية للرصف الثابت التي استنتجت من التحليل والمقترح أخذها في الاعتبار. كما يعرض الجدول (٥-٢٦) والجدول (٥-٢٧) والجدول (٥-٢٨) سماكات الطبقات الفردية لكل فئة تصنيف مروري لمدى من نسبة تحمل كاليفورنيا بما يتراوح من ٥-٩٪، ١٠-٢٠٪، وأكبر من ١٠٪، على التوالي.

الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية
h_{1SC}= 50 ملم
E_{1SC}= 3,000 ميجا باسكال
طبقة أساس للركام المرن غير مترابط
h_2= 200 ملم،
E_2= 280 ميجا باسكال
طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط
h_3= 200 ملم،
E_3= 130 ميجا باسكال
نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية
من 5 إلى 9 ٪

الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية
h_{1SC}= 50 ملم
E_{1SC}= 3,000 ميجا باسكال
طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط
h_2= 200 ملم،
E_2= 225 ميجا باسكال
نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة
الترابية 10 – 20 %

الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية
h_{1SC}= 50 ملم
E_{1SC}= 3,000 ميجا باسكال
طبقة أساس للركام المرن غير المترابط
h_2= 100 ملم،
E_2= 300 ميجا باسكال
نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة
الترابية ≤ 20 ٪

الشكل (٥–١٥) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: خفيف جدًا (VL).

الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 50 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال	الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 50 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال	الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 50 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال
طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 100 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال	طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 50 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال	طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 30 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال
طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2 = 200 ملم، E_2 = 280 ميجا باسكال	طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2 = 200 ملم، E_2 = 490 ميجا باسكال	طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2 = 100 ملم، E_2 = 650 ميجا باسكال
طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3 = 250 ملم، E_3 = 130 ميجا باسكال	طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3 = 100 ملم، E_3 = 225 ميجا باسكال	طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3 = 100 ملم، E_3 = 280 ميجا باسكال
نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية من 5 إلى 9 ٪	نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية 10 – 20 %	نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية ≤ 20 ٪

الشكل (٥–١٦) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: خفيف (L).

الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 50 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال	الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 50 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال	الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 50 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال
طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 150 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال	طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 100 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال	طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 70 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال
طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2 = 300 ملم، E_2 = 280 ميجا باسكال	طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2 = 200 ملم، E_2 = 490 ميجا باسكال	طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2 = 200 ملم، E_2 = 650 ميجا باسكال
طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3 = 250 ملم، E_3 = 130 ميجا باسكال	طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3 = 250 ملم، E_3 = 225 ميجا باسكال	طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3 = 250 ملم، E_3 = 280 ميجا باسكال
نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية من 5 إلى 9 ٪	نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية 10 – 20 %	نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية ≤ 20 ٪

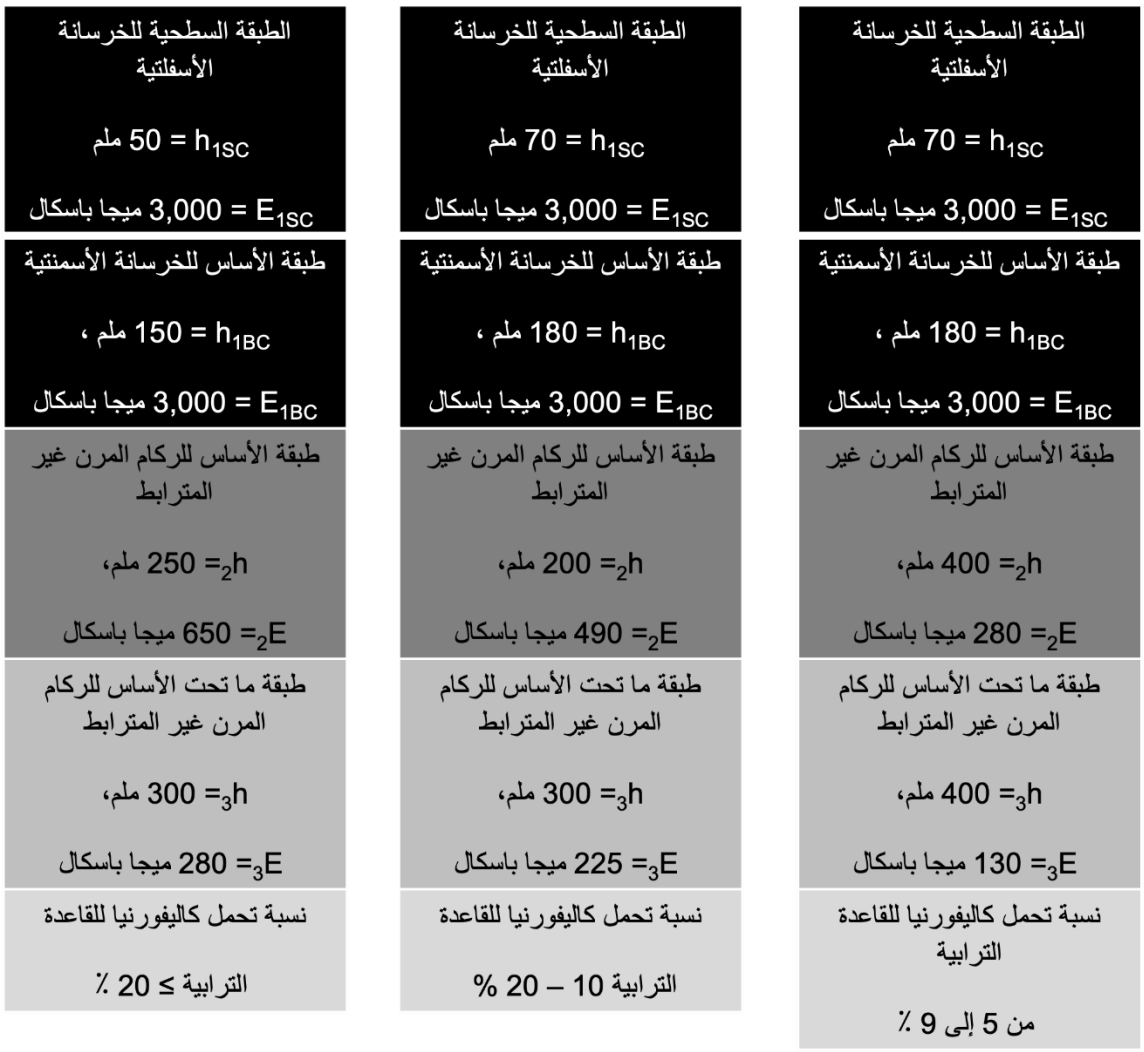
الشكل(٥–١٧) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: متوسط (M).

الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 70 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال	الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 50 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال	الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 50 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال
طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 180 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال	طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 140 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال	طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 100 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال
طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2 = 200 ملم، E_2 = 280 ميجا باسكال	طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2 = 200 ملم، E_2 = 490 ميجا باسكال	طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2 = 250 ملم، E_2 = 650 ميجا باسكال
طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3 = 300 ملم، E_3 = 130 ميجا باسكال	طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3 = 250 ملم، E_3 = 225 ميجا باسكال	طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3 = 250 ملم، E_3 = 280 ميجا باسكال
نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية من 5 إلى 9 ٪	نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية 10 – 20 %	نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية ≤ 20 ٪

الشكل (٥–١٨) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: مرتفع (H).

الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 70 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال	الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 50 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال	الطبقة السطحية للخرسانة الأسفلتية h_{1SC} = 50 ملم E_{1SC} = 3,000 ميجا باسكال
طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 180 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال	طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 170 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال	طبقة الأساس للخرسانة الأسمنتية h_{1BC} = 130 ملم ، E_{1BC} = 3,000 ميجا باسكال
طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2= 400 ملم، E_2= 280 ميجا باسكال	طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2= 200 ملم، E_2= 490 ميجا باسكال	طبقة الأساس للركام المرن غير المترابط h_2= 250 ملم، E_2= 650 ميجا باسكال
طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3= 300 ملم، E_3= 130 ميجا باسكال	طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3= 300 ملم، E_3= 225 ميجا باسكال	طبقة ما تحت الأساس للركام المرن غير المترابط h_3= 250 ملم، E_3= 280 ميجا باسكال
نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية من 5 إلى 9 ٪	نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية 10 – 20 %	نسبة تحمل كاليفورنيا للقاعدة الترابية ≤ 20 ٪

الشكل (٥–١٩) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: مرتفع جدًا (VH).



الشكل (٥–٢٠) المقاطع العرضية للرصف، فئة تصنيف المرور: مرتفع للغاية (EH).

الجدول (٥–٢٦) المقاطع العرضية للرصف الثابت، مدى نسبة تحمل كاليفورنيا (٥ - ٩ ٪).

الفئة	مدى مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL)	طبقة سطحية من الخرسانة الأسفلتية، ملم (بوصة)	طبقة أساس من الخرسانة الأسمنتية[١] مم (بوصة)	طبقة أساس[٢] مم (بوصة)	طبقة ما تحت الأساس[٣] مم (بوصة)
VL	أقل من ٠,٣	٥٠ (٢)	٠ (٠)	٢٠٠ (٨)	٢٠٠ (٨)
L	٠,٣ - ٣	٥٠ (٢)	١٠٠ (٤)	٢٥٠ (١٠)	٢٠٠ (٨)
M	٣ – ١٠	٥٠ (٢)	١٥٠ (٦)	٣٥٠ (١٤)	٢٥٠ (١٠)
H	١٠ - ٢٠	٧٠ (2 ¾)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٣٠٠ (١٢)
VH	٢٠ - ٣٠	٧٠ (2 ¾)	١٨٠ (٧)	٤٠٠ (١٦)	٣٠٠ (١٢)
EH	أكبر من ٣٠	٧٠ (2 ¾)	١٨٠ (٧)	٤٠٠ (١٦)	٤٠٠ (١٦)

١- معامل الخرسانة الأسمنتية ٣,٠٠٠ ميجا باسكال عند ٣٢ درجة مئوية.
٢- معامل الأساس يساوي ٢٨٠ ميجا باسكال.
٣- معامل ما تحت الأساس يساوي ١٣٠ ميجا باسكال.

الجدول (٥–٢٧) المقاطع العرضية للرصف الثابت، مدى نسبة تحمل كاليفورنيا (١٠ - ٢٠ ٪).

الفئة	مدى مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL)	طبقة سطحية من الخرسانة الأسفلتية، ملم (بوصة)	طبقة أساس من الخرسانة الأسمنتية[١] مم (بوصة)	طبقة أساس[٢] مم (بوصة)	طبقة ما تحت الأساس[٣] مم (بوصة)
VL	أقل من ٠,٣	٥٠ (٢)	٠ (٠)	٢٠٠ (٨)	٠ (٠)
L	٠,٣ - ٣	٥٠ (٢)	٥٠ (٢)	٢٠٠ (٨)	١٠٠ (٤)
M	٣ - ١٠	٥٠ (٢)	١٠٠ (٤)	٢٠٠ (٨)	٢٥٠ (١٠)
H	١٠ – ٢٠	٥٠ (٢)	١٤٠ (5 ½)	٢٠٠ (٨)	٢٥٠ (١٠)
VH	٢٠ - ٣٠	٥٠ (٢)	١٧٠ (6 ¾)	٢٠٠ (٨)	٣٠٠ (١٢)
EH	أكبر من ٣٠	٧٠ (2 ¾)	١٨٠ (٧)	٣٠٠ (١٢)	٣٠٠ (١٢)

١- *١- معامل الخرسانة الأسمنتية ٣٠٠٠ ميجا باسكال عند ٣٢ درجة مئوية
٢- معامل طبقة الأساس[٢] يساوي ٤٩٠ ميجا باسكال
٣- معامل طبقة الأساس[٣] يساوي ٢٢٥ ميجا باسكال

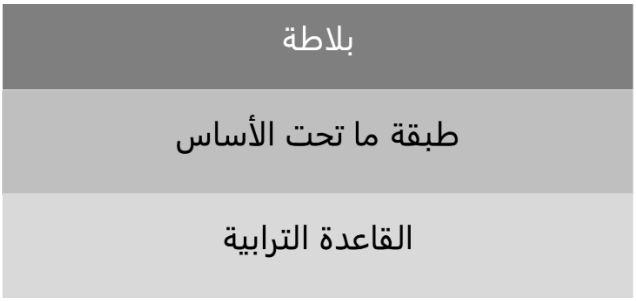
الجدول (٥–٢٨) المقاطع العرضية للرصف الثابت، مدى نسبة تحمل كاليفورنيا أكبر من ٢٠٪.

الفئة	مدى مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL)	طبقة سطحية من الخرسانة الأسفلتية، ملم (بوصة)	طبقة أساس من الخرسانة الأسمنتية[١] مم (بوصة)	طبقة أساس[٢] مم (بوصة)	طبقة ما تحت الأساس[٣] مم (بوصة)
VL	أقل من ٠,٣	(2) 50	0 (0)	(4) 100	(0) 0
L	٠,٣ - ٣	(2) 50	(1 3/16) 30	(4) 100	(4) 100
M	٣ - ١٠	(2) 50	(2 3/4) 70	(8) 200	(10) 250
H	١٠ – ٢٠	(2) 50	(4) 100	(10) 250	(10) 250
VH	٢٠ - ٣٠	(2) 50	(5 1/8) 130	(10) 250	(10) 250
EH	أكبر من ٣٠	(2) 50	(6) 150	(10) 250	(12) 300

٦- التصميم الإنشائي للرصف الصلب:

٦-١ نموذج الرصف:

تعتمد طريقة (AASHTO) للتصميم التجريبي لكل من الرصفيات الصلبة الجديدة والمُعاد إنشاؤها على العلاقات التجريبية بين الأحمال المرورية والمواد وأداء الرصف الذي طُوّر من طريق اختبار (AASHTO). أُعد دليل لتقديم توصيات بخصوص تحديد الهيكل الإنشائي للرصف على النحو الموضح في الشكل (٦-١) (AASHTO, 1993).



الشكل (٦–١) قطاع نموذجي للهيكل الإنشائي للرصف الصلب.

تتضمن طريقة التصميم البنود التالية:

- أداء الرصف.
- المرور.
- القاعدة الترابية.
- مواد الإنشاء.
- البيئة.
- صرف المياه.
- الموثوقية.

٦-٢ معايير التصميم:

معادلة التصميم الأساسية المستخدمة للرصفيات الصلبة هي كما يلي:

$$log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o \times 7.35 \times log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{log_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right]}{1+\frac{1.624\times10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times p_t) \times log_{10}\left[\frac{S_c' \times C_d \times (D^{0.75}-1.132)}{215.63 \times J \times \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(E_c/k\right)^{0.25}}\right]}\right]$$

المعادلة (٦-١)

حيث:

w_{18} = العدد المتوقع لعدد مرات تطبيق مكافئ الحمل المروري المحوري الم بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل).

Z_R = الانحراف الطبيعي المعياري.

S_o = الخطأ المعياري المركب للتنبؤ بالمرور والتنبؤ بالأداء.

D = سُمك (بوصة) بلاطة الرصف.

ΔPSI = الفرق بين مؤشر قابلية خدمة التصميم الابتدائي، p_i ، ومؤشر قابلية الخدمة النهائي للتصميم، p_t.

S_c' = معامل التمزق (رطل لكل بوصة) لخرسانة الأسمنت البورتلاندي المستخدمة في مشروع معين.

J = معامل نقل الحمل المستخدم للتعديل لخصائص نقل الحمل لتصميم معين.

C_d = معامل الصرف.

E_c = معامل المرونة (رطل لكل بوصة مربعة) لخرسانة الأسمنت البورتلاندي.

k = معامل رد فعل القاعدة الترابية (رطل لكل بوصة).

تُعرّف قابلية خدمة الرصف بأنها قدرة الرصف على خدمة نوع المرور الذي يستخدم المرفق. المقياس الأساسي لقابلية الخدمة هو مؤشر قابلية الخدمة الحالي (PSI) والذي يتراوح من صفر (طريق مستحيل) إلى ٥ (طريق مثالي). تتمثل فلسفة التصميم الأساسية في طريقة دليل (AASHTO) في مفهوم قابلية الخدمة-الأداء، والذي يوفر وسيلة لتصميم رصف بناء على حجم مرور إجمالي محدد والحد الأدنى من مستوى قابلية الخدمة المطلوب في نهاية فترة الأداء.

يعتمد اختيار أقل مقياس مسموح به في مؤشر قابلية الخدمة الحالي (PSI) أو مؤشر قابلية الخدمة النهائي (p_t) على أدنى مؤشر سيُتحمل قبل ضرورة إعادة التأهيل أو إعادة إنشاء الطبقة السطحية أو إعادة الإنشاء. يوضح الجدول (٥-٤) إرشادات عامة للمستويات الدنيا لمؤشر قابلية الخدمة النهائية (p_t).

بالنسبة للطرق الفرعية نسبيا حيث تتطلب الاعتبارات الاقتصادية الحفاظ على النفقات الرأسمالية الأولية عند الحد الأدنى، يُقترح تحقيق ذلك عن طريق تقليل العمر التصميمي أو إجمالي حجم المرور، بدلا من تصميم قابلية خدمة نهائي قيمته أقل من ٢,٠.

نظرا لأن الوقت الذي يصل فيه هيكل رصف معين إلى قابلية الخدمة النهائي يعتمد على حجم المرور ومؤشر قابلية الخدمة الأصلي أو الابتدائي (p_i)، فيجب النظر في كيفية اختيار قيمة مؤشر قابلية الخدمة الابتدائي (p_i). يوصى باستخدام قيمة ٤,٥ للرصفيات الصلبة. تُطبّق المعادلة (٥-١) لتحديد إجمالي التغير في مؤشر قابلية الخدمة (ΔPSI).

٦-٣ العمر التصميمي:

يُشير العمر التصميمي إلى المدة الزمنية التي يجب إجراء التحليل لها، أي الفترة الزمنية التي يجب أن تغطيها أي استراتيجية تصميم. عادةً ما تُصمم وتحلل الرصفيات الصلبة لفترة أداء قدرها ٣٠ عامًا.

٦-٤ الأحمال المرورية:

المعلومات المرورية مطلوبة في المعادلات التصميمية المستخدمة في طريقة دليل (AASHT0) للتصميم التجريبي، مثل: الأحمال المحورية وتكوين المحاور وعدد مرات تطبيقها. يمكن تمثيل التأثير المُتلف لمرور محور ما له أي حمل بمكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) الذي وزنه ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل). لذلك، يجب تحويل المرور المختلط إلى عدد مكافئ من الحمل المروري المحوري المفرد بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل). وتشمل طريقة تحقيق ذلك ما يلي:

- اشتقاق عوامل تكافؤ الحمل.
- تحويل المرور المختلط إلى عدد مرات تطبيق مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل)
- اعتبارات توزيع المرور على المسارات.

للتعبير عن أحمال المحاور المتفاوتة بمعلمة تصميم واحدة، من الضروري تطوير عوامل تكافؤ أحمال المحاور. عند ضرب هذه العوامل في عدد أحمال المحاور ضمن فئة وزن معينة، فإنها تعطي عدد مرات تطبيقات الحمل المروري المحوري المفرد بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل) التي سيكون لها تأثير مكافئ على أداء الهياكل الإنشائية للرصف.

تُمثل عوامل تكافؤ الحمل نسبة عدد تكرارات مرور حمل أي محور وتكوين المحور (سواء كان أحادي أو ترادفي أو ثلاثي) اللازمة لتسبب نفس الانخفاض في مؤشر قابلية الخدمة الحالي (PSI) لمرور حمل واحد لمحور أحادي وزنه ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل). للوصول إلى مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) التصميمية، من الضروري افتراض سمك البلاطة (D) ثم اختيار عوامل التكافؤ المدرجة في الجداول من (د-١) وحتى (د-٩) في الملحق (د)، أو قيم قابلية الخدمة النهائي ٢,٠ و ٢,٥ و ٣,٠. عادةً

ما يؤدي استخدام سمك البلاطة (D) بقيمة ٢٢٨,٦ مم (٩ بوصة) لتحديد عوامل مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل) إلى نتائج دقيقة بشكل كافٍ للأغراض التصميمية، على الرغم من أن التصميم النهائي يمكن أن يكون مختلفًا إلى حدٍ ما. عند الحاجة إلى نتائج أكثر دقة ويكون التصميم المحسوب مختلفًا بشكل ملحوظ (١ بوصة في خرسانة أسمنت بورتلاندي) عن القيمة المفترضة، ينبغي افتراض قيمة جديدة وإعادة حساب تصميم حركة مرور مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل) أو (w_{18})، ومن ثم تحديد التصميم الإنشائي للوحدات التراكمية لمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (w_{18}) الجديدة. ينبغي الاستمرار في الخطوات حتى تصبح القيم المفترضة والمحسوبة قريبة على النحو المرغوب.

إذا كان عدد الأحمال المحورية المكافئة يمثل الإجمالي لجميع المسارات في الاتجاهين، فيجب توزيع هذا العدد حسب الاتجاه والمسار للأغراض التصميمية. عادة ما يتم التوزيع الاتجاهي عن طريق تخصيص ٥٠ ٪ من المرور لكل اتجاه ما لم تكن هناك اعتبارات خاصة تبرر نسب تخصيص أخرى (مثل: تحرك المزيد من الشاحنات المحملة في اتجاه واحد والمزيد من الشاحنات الفارغة في الاتجاه الآخر). وفيما يتعلق بالتوزيع على المسارات، طُورت عوامل للتوزيع على المسارات في المرافق متعددة المسارات.

عند حساب مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) لتصميم مشروع معين، من المناسب تحويل التوزيع المروري المُقدر إلى عوامل أحمال شاحنات. يوجد طريقتان لحساب عوامل أحمال الشاحنات.

عندما تتوفر معلومات الأحمال المحورية من إحدى محطات الوزن التي يمكن افتراض أنها ممثلة للمرور على الرصف المراد تصميمه، فإنه يمكن حساب عامل أحمال الشاحنات مباشرة.

بالنسبة للحالات التصميمية التي يتوقع فيها أن يستمر الهيكل الإنشائي المبدئي للرصف في أدائه، أثناء فترة التحليل بدون إعادة تأهيل أو إعادة إنشاء طبقة السطح، فكل ما يلزم حينئذٍ هو حساب إجمالي المرور خلال فترة التحليل. المرور المتوقع -عمومًا- هو عدد مرات التطبيق التراكمية المتوقعة على الطريق لمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل)، وذلك عندما يتطلب المصمم عدد مرات تطبيق المحور في المسار التصميمي. وبالتالي، يجب على المصمم أن يحسب المرور التصميمي حسب الاتجاه ثم حسب المسار (في حال وجود أكثر من مسارين). يمكن استخدام المعادلة (٥-٤) لتحديد الوحدات التراكمية لمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) (w_{18}) في المسار التصميمي.

على الرغم من أن قيمة معامل التوزيع الاتجاهي (D_D) تعادل بشكل عام ٠,٥ (٥٠ في المائة) لمعظم الطرق، إلا أن هناك حالات يمكن أن يتحرك فيها المزيد من الوزن في اتجاه واحد أكثر من الآخر. وبالتالي، ينبغي تصميم الجانب الذي يحتوي على مركبات أثقل بوحدات ذات أرقام أعلى من الحمل المكافئ للمحور الأحادي. يمكن أن تتراوح قيمة معامل التوزيع الاتجاهي (D_D) من ٠,٣ إلى ٠,٧، حسب الاتجاه "المُحمّل" والاتجاه "غير المُحمّل". بالنسبة لمعامل التوزيع على المسارات (D_L) ، سيُستخدم الجدول (٥-٦) كدليل.

٥-٦ الموثوقية:

يُستخدم مبدأ الموثوقية كوسيلة لتحقيق قدر ما من الثقة في عملية التصميم للتأكد من بقاء بدائل التصميم المختلفة صامدة طوال فترة التحليل. يعبر معامل الموثوقية عن الاختلافات العشوائية كل من تنبؤات المرور (w_{18}) والتنبؤ بالأداء (W_{18}) ومن ثم يوفر مستويات ضمان (R) محددة مُسبقًا لتأكيد أن قطاعات الرصف ستبقى صامدة طوال الفترة المصممة لها.

وبصفة عامة، مع تزايد حجم المرور وصعوبة تحويل المرور وتنامي تطلعات العامة بخصوص توافر الطريق للاستخدام، يجب تقليص خطر عدم تلبية التطلعات. ويمكن تحقيق ذلك باختيار مستويات أعلى من الموثوقية. يعرض الجدول (٥-٧) مستويات الموثوقية الموصى بها لمختلف التصنيفات الوظيفية.

ويُتحكم في موثوقية التصميم من خلال استخدام معامل ثقة (F_R) مضروبًا في المرور المتوقع على امتداد فترة التصميم (w_{18}) للحصول على قيمة (W_{18}) المستخدمة في معادلة التصميم. عند مستوى محدد من الموثوقية (R)، يكون معامل الموثوقية دالة في الانحراف المعياري الكلي (S_o)، والذ يأخذ في اعتباره كل من الاختلاف العشوائي والطبيعي في تنبؤات المرور، والاختلاف الطبيعي في تنبؤ أداء الرصف عند قيمة w_{18} محددة.

يتطلب تطبيق مبدأ الموثوقية اتباع الخطوات التالية:

١- حدد التصنيف الوظيفي للمرفق، وحدد ما إذا كانت الظروف المحيطة ريفية أم حضرية.
٢- اختر مستوى الموثوقية من المدى الوارد في الجدول (٥-٧). وكلما ارتفعت قيمة الموثوقية، اقتضت الحاجة المزيد من بُنية الرصف.
٣- ينبغي اختيار الانحراف المعياري (S_o) الذي يُمثِّل الظروف المحلية. علمًا بأن قيم الانحراف المعياري (S_o) المتضمنة في طريق اختبار (AASHTO) لم يشتمل على أي خطأ يتعلق بالمرور. غير أن الخطأ في التنبؤ بالأداء المطور في طريق الاختبار بلغ ٠,٢٥ للرصفيات الصلبة. وهذا يتوافق مع إجمالي الانحراف المعياري للمرور البالغ ٠,٣٥.

٦-٦ العوامل البيئية:

قد تؤثر البيئة على أداء الرصف بعدة طرق. فمن الممكن أن تؤثر التغيرات في درجات الحرارة والرطوبة على قوة الرصف ومتانته وقدرته على تحمل الأحمال وكذلك على مواد القاعدة الترابية.

تتم المعالجة الخاصة بمستوى الصرف المتوقع للرصف الصلب من خلال استخدام معامل الصرف (C_d)، في معادلة الأداء. يتضمن الجدول (٦-١) قيم C_d الموصى بها اعتمادًا على جودة الصرف (الجدول ٥-١٠) والنسبة المئوية من الزمن الذي قد يتعرض خلاله الهيكل الإنشائي للرصف عادةً لمستويات رطوبة تقترب من التشبُّع على مدار العام. وتعتمد هذه النسبة على المتوسط السنوي لتساقط الأمطار وظروف الصرف السائدة.

الجدول (٦–١) القيم الموصى بها لمعامل الصرف (Cd) لتصميم الرصف الصلب.

جودة الصرف	النسبة المئوية من الزمن الذي قد يتعرض خلاله الهيكل الإنشائي للرصف لمستويات رطوبة تقترب من التشبُّع			
	أقل من ١ ٪	١ - ٥ ٪	٥ - ٢٥ ٪	أكبر من ٢٥٪
ممتاز	١,٢٥ - ١,٢٠	١,٢٠ - ١,١٥	١,١٥ - ١,١٠	١,١٠
جيد	١,٢٠ - ١,١٥	١,١٥ - ١,١٠	١,١٠ - ١,٠٠	١,٠٠
مقبول	١,١٥ - ١,١٠	١,١٠ - ١,٠٠	١,٠٠ - ٠,٩٠	٠,٩٠
ضعيف	١,١٠ - ١,٠٠	١,٠٠ - ٠,٩٠	٠,٩٠ - ٠,٨٠	٠,٨٠
ضعيف للغاية	١,٠٠ - ٠,٩٠	٠,٩٠ - ٠,٨٠	٠,٨٠ - ٠,٧٠	٠,٧٠

٦-٧ خصائص المواد:

تتألف الرصفيات الصلبة عمومًا من قاعدة ترابية مُجهّزة أسفل طبقة ما تحت الأساس وبلاطة الرصف. وقد تكون طبقة ما تحت الأساس مُثبّتة أو غير مُثبّتة. في حال تصميم طريق منخفض الحجم المروري حيث ينخفض مرور الشاحنات، فعندئذٍ يمكن ألا لا يكون من الضروري وضع طبقة ما تحت الأساس بين القاعدة الترابية المُجهزة وبلاطة الرصف.

٦-٧-١ المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية:

على نحوٍ مماثل للمعامل الفعال لمرونة القاعدة الترابية في تصميم الرصف المرن، سيُطور معامل فعال لرد فعل القاعدة الترابية (قيمة-k) في تصميم الرصف الصلب. نظرًا لأن (قيمة-k) تتناسب طرديًا مع معامل مرونة القاعدة الترابية، سوف تستخدم أطوال الموسم والمعاملات الموسمية المُطورة باستخدام الجدول (٦-٧) كمدخلات لتقدير (قيمة-k) للتصميم الفعال. غير أنه بسبب تأثيرات خصائص طبقة ما تحت الأساس على (قيمة-k) للتصميم الفعَّال، فإن تحديدها مشمول كخطوة في طريقة التصميم بالمحاولات التكرارية (iterative) (القسم الفرعي ٦-٨-٢-١).

٦-٧-٢ طبقة ما تحت الأساس:

تتألف طبقة ما تحت الأساس للهيكل الإنشائي للرصف الصلب من طبقة مدموكة واحدة أو أكثر مكونة من مادة حبيبية أو مُثبتة والتي توضع بين القاعدة الترابية والبلاطة الصلبة تحقيقًا للأغراض التالية:

١- توفير دعم منتظم ومستقر ودائم.
٢- زيادة معامل رد فعل القاعدة الترابية (k).
٣- تقليل الآثار الضارة للصقيع إلى أدنى حد.
٤- الحيلولة دون ضخ وتسرب التربة ذات الحبيبات الدقيقة عند الفواصل والشقوق وحواف البلاطة الصلبة.
٥- توفير منصة عمل لمعدات الإنشاء.

تنتفي الحاجة إلى وجود طبقة ما تحت الأساس إضافية إذا كانت القاعدة الترابية تتسم بجودة مماثلة لتلك الموجودة في طبقة ما تحت الأساس، أو إذا كانت المرور التصميمي أقل من مليون مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل).

وتتوفر عدة أنواع مختلفة من طبقة ما تحت الأساس التي يمكن استخدامها. وهي تتضمن المواد الحبيبية المتدرجة والمواد المُثبّتة بمُضافات مناسبة. إن منع تراكم المياه فوق أو داخل القاعدة الترابية أو طبقات ما تحت الأساس يعد أمرًا ضروريًا لكي يصبح أداء الهيكل الإنشائي للرصف مرضيًا. ولأغراض الصرف، يوصى بتمديد طبقة ما تحت الأساس لمسافة تتراوح من ٠,٣ م إلى ٠,٩١ م (من ١ إلى ٣ قدم) خارج الطريق المرصوف أو في الميل إذا لزم الأمر.

٦-٧-٣ البلاطة:

المواد الأساسية المستخدمة في بلاطة الرصف هي خرسانة الأسمنت البورتلاندي وحديد تسليح وأجهزة تحويل الأحمال ومواد عازلة لمنع التسرب عند الفواصل.

٦-٧-٣-١ ٦-٧-٣-١ خرسانة الأسمنت البورتلاندي (PCC):

ينبغي أن يكون تصميم الخلطة ومواصفات المواد للخرسانة وفقًا لمتطلبات دليل مواصفات (AASHTO) لإنشاء الطرق، والمواصفات القياسية لمواد النقل، أو ما يكافئها. وفي ظل الظروف المحددة لمشروع معين، ينبغي تحديد الحد الأدنى لعامل الأسمنت استنادًا إلى اختبارات معملية وتجارب مُسبقة للقوة والمتانة.

وينبغي استخدام خرسانة حابسة للهواء كلما كان ذلك ضروريًا بهدف تزويد الطبقة السطحية بمقاومة ضد التدهور بسبب التجمد والذوبان أو التدهور بسبب الأملاح أو لتحسين قابلية مناولة (مشغولية) الخلطة.

٦-٧-٣-١-١ ٦-٧-٣-١-١ معامل مرونة خرسانة الأسمنت البورتلاندي

ينبغي تحديد معامل مرونة خرسانة الأسمنت البورتلاندي وفقًا للطريقة الموضحة في (ASTM C469). كما يمكن -أيضًا- تقدير معامل المرونة باستخدام علاقات الارتباط المُطورة. وفيما يلي علاقة الارتباط التي يوصى بها معهد الخرسانة الأمريكي لخرسانة الأسمنت البورتلاندي ذات الوزن الطبيعي:

$$E_c = 57000 \times (f'_c)^{0.5}$$ **المعادلة (٦-٢)**

حيث:

E_c = معامل المرونة لخرسانة الأسمنت البورتلاندي (رطل لكل بوصة مربعة).

F_c' = قوة ضغط خرسانة الأسمنت البورتلاندي (رطل لكل بوصة مربعة) على النحو المحدد باستخدام المواصفات (AASHTO T22) و (AASHTO T140) و (ASTM C39).

٦-٧-٣-١-٢ معامل تمزق خرسانة الأسمنت البورتلاندي

يتطلب تصميم الرصفيات الصلبة تحديد معامل التمزق (مقاومة الانحناء) لخرسانة الأسمنت البورتلاندي. علمًا بأن معامل التمزق الذي المطلوب لطريقة التصميم هو متوسط القيمة المحددة بعد ٢٨ يوم باستخدام تحميل النقطة الثالثة، انظر المواصفتين (AASHTO T97) و (ASTM C78).

بسبب معالجة الموثوقية في دليل التصميم الماثل، ينصح بشدة عدم استخدام مواصفات الإنشاء العادية لمعامل التمزق (مقاومة الانحناء) كمدخلات، وذلك نظرًا لكونها تمثل قيمة يمكن ألا يندرج تحتها سوى نسبة مئوية ضئيلة فقط من التوزيع. فإذا كان من المرغوب استخدام مواصفات الإنشاء، فعندئذٍ ينبغي إجراء بعض التعديل استنادًا إلى الانحراف المعياري لمعامل التمزق والنسبة المئوية (PS) لتوزيع القوة التي عادةً ما تقع خارج حدود المواصفات:

المعادلة (٦-٣)

$$S'_C(mean) = S_c + z \times SD_s$$

حيث:

S_c' = القيمة المتوسطة المُقدرة لمعامل تمزق خرسانة الأسمنت البورتلاندي.

S_c = مواصفات الإنشاء بشأن معامل تمزق الخرسانة (رطل لكل بوصة مربعة).

SD_s = الانحراف المعياري المُقدر لمعامل تمزق الخرسانة (رطل لكل بوصة مربعة).

z = المتغير الطبيعي القياسي (z):

- PS = 20٪ عند ٠,٨٤١
- PS = 15 ٪ عند ١,٠٣٧
- PS = 10 ٪ عند ١,٢٨٢
- PS = 5 ٪ عند ١,٦٤٥
- PS = 1٪ عند ٢,٣٢٧

٦-٧-٣-٢ حديد التسليح

ينبغي أن يحتوي حديد التسليح المستخدم في البلاطة على نتوءات سطحية مناسبة للترابط وتطوير إجهادات عاملة في الحديد. وفي شبكة الأسلاك الفولاذية الناعمة يتكون هذا الترابط من خلال الأسلاك الفولاذية العرضية الملحومة. أما بالنسبة لنسيج الأسلاك الفولاذية المُحزَّزة، فيتكون الترابط من خلال النتوءات على السلك الفولاذي وعند التقاطعات الملحومة.

٦-٧-٣-٣ مواد منع التسرب عند الفواصل

تستخدم ثلاثة أنواع أساسية من المواد العازلة المانعة للتسرب لسد الفواصل:

١- مانعات تسرب سائلة. وتشتمل على طائفة متنوعة من المواد منها: الأسفلت والمطاط المصبوب على الساخن والمُركَّبات المرنة والسيليكون والبوليمرات. حيث تصب المواد داخل الفاصل في شكل سائل وتترك حتى تتصلب. وينبغي التعامل باحتراس عند استخدام مواد منع التسرب السائلة لتوفير عامل الشكل المناسب للحركة المتوقعة.

٢- مانعات تسرب مرنة مسبقة التشكيل. وهي عبارة عن مادة عازلة انبثاقيه من مطاط النيوبرين تحتوي على شبكات داخلية تبذل قوة خارجية ضد سطح الفاصل. علمًا بأن الحجم وعرض التركيب يعتمدان على مقدار الحركة المتوقعة عند الفاصل.

٣- حشوة فاصل التمدد من الفلين. يوجد نوعان من حشوات الفلين: (أ) حشوة فاصل التمدد القياسية و (ب) حشوة من النوع ذاتي التمدد (SE).

٦-٧-٤ الفواصل الطولية:

تعد الفواصل الطولية ضرورية لتشكيل شقوق في المكان المطلوب بحيث تكون محكمة السد. ويمكن أن تكون هذه الفواصل مقفلة أو مبطنة أو مقيدة أو خليط منها. وينبغي قطع الفواصل الطولية بمنشار أو تشكيلها ليصبح عمقها ربع سماكة البلاطة على الأقل. ويعد توقيت القطع بالمنشار أمرًا بالغ الأهمية لتشكيل الشقوق في المكان المطلوب.

علمًا بأن أقصى مسافة موصى بها للفواصل الطولية هي ٤,٨٧ م (١٦ قدم).

٦-٧-٥ أجهزة تحويل الأحمال:

ينبغي توافر السمات التالية في أجهزة تحويل الأحمال الميكانيكية للوصلات المستعرضة:

- ينبغي أن تكون بسيطة من حيث التصميم وسهلة التركيب وأن تسمح بالتغليف الكامل بالخرسانة.
- ينبغي أن تعمل على توزيع إجهادات الأحمال بشكلٍ صحيح دون تعريض الخرسانة لفرط إجهاد عند ملامستها للجهاز.
- ينبغي أن توفر قدرًا بسيطًا من التقييد للحركة الطولية للفاصل في أي وقت.
- ينبغي أن تكون مستقرة ميكانيكياً تحت أوزان أحمال المركبات وتكراراتها التي ستكون سائدة عمليًا.
- ينبغي أن تكون مقاومة للصدأ عند استخدامها في مواقع جغرافية تعاني من العناصر المسببة للصدأ.

يعد الوتد (الدسار) الحديدي الدائري الأملس بمثابة جهاز تحويل الأحمال الأكثر استعمالاً، وهو متوافق مع الدرجة ٦٠ أو أعلى وفق مواصفة (AASHTO M31). ورغم أن القضبان الوتدية الدائرية هي الأكثر شيوعًا، فمن الممكن أيضًا استخدام أجهزة ميكانيكية أخرى، مثل قضبان البوليمر المقواة بالألياف الزجاجية (GFRB)، والتي يمكن أن تثبت جدواها في التركيبات الميدانية.

ويمكن أيضًا النظر في استبعاد أجهزة تحويل الأحمال من الوصلات الملساء الضعيفة المستعرضة في الرصفيات الخرسانية ذات الفواصل العادية متى كانت مؤسسة على قاعدة مسامية مُعالجة.

٦-٧-٦ قضبان الربط:

صُممت قضبان الربط، سواء كانت قضبان فولاذية أو موصلات مُحزَّزة، بهدف تثبيت أسطح البلاطات المتجاورة في وضعية تلامس وثيق. وقد صُممت قضبان الربط لتتحمل أقصى قوى الشد المطلوبة لمقاومة انجراف القاعدة الترابية. غير أنها لم تُصمم للاستخدام كأجهزة تحويل الأحمال.

وينبغي أن تصنع القضبان المحزَّزة باستخدام سبيكة فولاذية المحور من الدرجة ٤٠ مطابقة للمواصفة (AASHTO M31).

ويمكن أيضًا استخدام موصلات أخرى معتمدة. وينبغي أن تكون قوة الشد لهذه الموصلات مساوية لتلك الخاصة بالقضيب المُحزَّز المطلوب.

وينبغي مراعاة استخدام مواد أو طلاءات مقاومة للصدأ على كلٍ من قضبان الشد والقضبان الوتدية حيثما كان من المتوقع تعرض سطح الرصف لأملاح.

٦-٨ التصميم الإنشائي:

يصف هذا الجزء تصميم رصفيات خرسانة الأسمنت البورتلاندي، بما في ذلك الرصفيات الخرسانية العادية ذات الفواصل (JCP)، والرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل (JRCP)، والرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح (CRCP). حيث إنه من المتأصل في استخدام الطريقة استخدام القضبان الوتدية في الفواصل العرضية. وبالتالي، لا يعتبر التصدع فيها مظهرًا من مظاهر تكبير العيوب.

٦-٨-١ الخصائص الإنشائية للرصفيات:

٦-٨-١-١ تحويل الأحمال:

معامل تحويل الأحمال (J) هو عامل يستخدم في تصميم الرصف الصلب لحساب قدرة بُنية الرصف الخرساني على تحويل (توزيع) الأحمال عبر الفواصل، مثل الوصلات أو الشقوق. تؤثر أجهزة تحويل الأحمال، وتشابك الركام، ووجود أكتاف خرسانية مربوطة على هذه القيمة. وبشكل عام، تزداد قيمة (J) لمجموعة معينة من الظروف (على سبيل المثال، الرصف الخرساني المرتبط مع الأكتاف المربوطة) مع زيادة الأحمال المرورية لأن قدرة الركام على تحويل الأحمال يقل مع تكرارها. يحدد الجدول (٦-٢) مدى معاملات تحويل ونقل الأحمال للظروف المختلفة التي طُورت من التجربة وتحليل الإجهاد الميكانيكي. وكدليل عام لمدى قيم (J)، ينبغي استخدام قيم (J) الأعلى مع قيم (k) المنخفضة والمعاملات الحرارية العالية والتباينات الكبيرة في درجة الحرارة.

الجدول (٦–٢) معامل تحويل الأحمال الموصى به لمختلف أنواع الرصف وظروف التصميم (AASHTO, 1993).

كتف	أسفلت		خرسانة أسمنت بورتلاندي مربوطة	
أجهزة تحويل الأحمال	نعم	لا	نعم	لا
نوع الرصف				
عادية بفواصل ومسلحة بفواصل	٣,٢	٣,٨ - ٤,٤	٢,٥ - ٣,١	٣,٦ - ٤,٢
رصفيات خرسانية مسلحة مستمرة	٢,٩ - ٣,٢	لا ينطبق	٢,٣ - ٢,٩	لا ينطبق

في حالة استخدام القضبان الوتدية، ينبغي تحديد المقاس والتباعد من خلال إجراءات الجهة المحلية و/أو خبرتها. وكمبدأ توجيهي عام، ينبغي أن يكون قطر الوتد مساويًا لسمك البلاطة مضروبًا في (٨\١) (على سبيل المثال، بالنسبة لسُمك البلاطة البالغ ٢٥٠ مم (١٠ بوصة)، يكون القطر ٣١,٧ مم (١,٢٥ بوصة)). وعادة ما يكون تباعد القضبان الوتدية وطولها ٣٠٠ مم (١٢ بوصة) و٤٥٧ مم (١٨ بوصة) على التوالي.

الرصفيات ذات الفواصل

قيمة (J) الموصى بها لرصف الخرسانة العادية ذو فواصل (JPC) أو رصف الخرسانة المسلحة ذو فواصل (JRCP) مع بعض أنواع أجهزة تحويل الأحمال (مثل: القضبان الوتدية) عند الفواصل هي (٣,٢). وتشير هذه القيمة إلى تحويل أحمال الرصفيات ذات الفواصل بدون أكتاف خرسانية مربوطة.

بالنسبة للرصفيات ذات الفواصل بدون أجهزة تحويل الأحمال في الفواصل، يوصى بقيمة (J) من (٣,٨) إلى (٤,٤). هذا يأخذ في حسبانه بشكل أساسي إجهادات الانحناء المرتفعة التي تتطور في الرصفيات غير المزودة بقضبان وتدية ولكنها -أيضًا- تتضمن بعض الاعتبارات لاحتمال زيادة التصدع. وفي حال كان للخرسانة معامل حراري مرتفع، فيجب زيادة قيمة (J). ومن ناحية أخرى، في حال كان من المتوقع وجود عدد قليل من الشاحنات الثقيلة مثل على طريق منخفض الحجم، فيمكن أن تُخفّض قيمة (J) نظرًا لأن فقدان تشابك الركام سيكون أقل.

الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح

تتراوح قيمة (J) الموصى بها لرصفيات الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح بدون أكتاف خرسانية مربوطة من (٢,٩) إلى (٣,٢)، وذلك اعتمادًا على قدرة تشابك الركام (عند الشقوق المستعرضة المستقبلية) على تحويل الأحمال.

الأكتاف المربوطة للمسارات الخارجية الموسعة. تتمثل إحدى المزايا الرئيسة لاستخدام أكتاف خرسانة الأسمنت البورتلاندي (أو المسارات الخارجية الموسعة) في تقليل إجهاد البلاطة وزيادة عمر الخدمة الذي توفره. ولأخذ هذا في الحسبان، يمكن استخدام قيم منخفضة إلى حدٍ كبير للمعامل (J) لتصميم كلٍ من الرصفيات ذات الفواصل والمستمرة.

بالنسبة لرصفيات الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح مع أكتاف خرسانية مربوطة (ينبغي أن يكون الحد الأدنى لحجم القضيب والحد الأقصى للتباعد بين قضبان الربط هو نفسه كما في حالة قضبان الربط بين المسارات)، يتراوح مدى (J) من (٢,٣) إلى (٢,٩)، مع قيمة موصى بها تبلغ (٢,٦). هذه القيمة أقل بكثير من تلك الخاصة بتصميم الرصفيات الخرسانية بدون أكتاف مربوطة بسبب الزيادة الكبيرة في قدرة توزيع الحمل للرصفيات الخرسانية ذات الأكتاف المربوطة.

بالنسبة للرصفيات الخرسانية ذات الفواصل والمزودة بقضبان وتدية وأكتاف مربوطة، يجب أن تكون قيمة (J) بين (٢,٥) و (٣,١). تفترض قيمة (J) المنخفضة للأكتاف المربوطة بأنه لا يُسمح للمرور بالسير على الكتف.

٢-١-٨-٦ فقدان الدعم:

يُضمن عامل فقدان الدعم (LS)، في تصميم الرصفيات الصلبة لمراعاة الفقدان المحتمل للدعم الناتج عن انجراف القاعدة الترابية و/أو حركات التربة الرأسية التفاضلية. ويُعالج في طريقة التصميم الفعلية من خلال تقليل (قيمة-k) الفعالة أو المُركبة بناءً على حجم الفراغات التي يمكن ان تحدث تحت البلاطة. يوفر الجدول (٦-٣) بعض قيم المدى المقترحة للعامل (LS) اعتمادًا على نوع المادة (على وجه التحديد صلابتها أو معامل مرونتها). وفي حال كان سيُنظر في مختلف أنواع طبقة الأساس أو طبقة ما تحت الأساس للتصميم، فينبغي تحديد القيم المقابلة للعامل (LS) لكل نوع.

الجدول (٦–٣) بعض قيم المدى النموذجية لعامل فقدان الدعم (LS) لأنواع مختلفة من المواد (AASHTO, 1993).

نوع المادة	عامل فقدان الدعم (LS)
أساس حبيبي معالج بالأسمنت **E = من ٦,٩٠٠ إلى ١٣,٨٠٠ ميجا باسكال** **(E = من مليون إلى مليونين رطل لكل بوصة مربعة)**	١,٠ - ٠,٠
خلطات الركام والأسمنت **E = من ٣,٥٠٠ إلى ٦,٩٠٠ ميجا باسكال** **(E = من ٥٠٠ ألف إلى مليون رطل لكل بوصة مربعة)**	١,٠ - ٠,٠

نوع المادة	عامل فقدان الدعم (LS)
أساس معالج بالأسفلت **E = من ٢,٤٠٠ إلى ٦,٩٠٠ ميجا باسكال** **(E = من ٣٥٠ ألف إلى مليون رطل لكل بوصة مربعة)**	١,٠ - ٠,٠
خلطات أسفلت مُثبّتة **E = من ٢٨٠ إلى ٢,١٠٠ ميجا باسكال** **(E = من ٤٠ إلى ٣٠٠ ألف رطل لكل بوصة مربعة)**	١,٠ - ٠,٠
مُثبت بالجير **E = من ١٤٠ إلى ٤٨٠ ميجا باسكال** **(E = من ٢٠ إلى ٧٠ ألف رطل لكل بوصة مربعة)**	٣,٠ - ١,٠
مواد حبيبية غير مترابطة **E = من ١٠٠ إلى ٣١٠ ميجا باسكال** **(E = من ١٥ إلى ٤٥ ألف رطل لكل بوصة مربعة)**	٣,٠ - ١,٠
مواد حبيبية دقيقة أو مواد قاعدة ترابية طبيعية **E = من ٢٠ إلى ٢٨٠ ميجا باسكال** **(E = من ٣ آلاف إلى ٤٠ ألف رطل لكل بوصة مربعة)**	٣,٠ – ٢,٠
ملحوظة: تُشير (E) في هذا الجدول إلى الرمز العام للمعامل المرن للمادة.	

ينبغي -أيضًا- النظر في العامل (LS) من حيث حركات التربة الرأسية التفاضلية التي يمكن أن تؤدي إلى تكون فراغات أسفل الرصف. وهكذا، على الرغم من استخدام طبقة ما تحت أساس غير قابلة للتجريف، إلا أن الفراغ يمكن أن يستمر في التطور، مما يقلل من عمر الرصف. عمومًا، بالنسبة للطين الانتفاخي النشط أو انتفاخ الصقيع المفرط، يمكن أخذ قيم (LS) من (٢,٠) إلى (٣,٠) في الاعتبار.

٦-٨-١-٣ متغيرات التسليح:

٦-٨-١-٣-١ رصفيات الخرسانة المسلحة ذات الفواصل:

هناك نوعان يندرجان تحت فئة الرصفيات ذات الفواصل: الرصفيات الخرسانية العادية ذات الفواصل (JCP)، المصممة بحيث لا تحتوي على حديد التسليح، والرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل (JRCP)، المصممة لتكون ذات حديد تسليح كبير، من حيث قضبان الحديد أو حصائر الحديد الملحومة. ويُضاف تسليح الحديد إذا كان احتمال حدوث تشقق عرضي أثناء عمر الرصف مرتفعًا بسبب عوامل مثل حركة التربة و/أو إجهادات تغير درجة الحرارة/الرطوبة.

في حالة الرصفيات الخرسانية العادية ذات الفواصل (JCP)، ينبغي اختيار قيم تباعد الفواصل بحيث لا تؤدي إجهادات تغير درجة الحرارة والرطوبة إلى حدوث تشقق وسطي بين الفواصل. سيختلف أقصى تباعد للفواصل، اعتمادًا على الظروف المحلية وأنواع طبقات ما تحت الأساس وأنواع الركام الخشن وما إلى ذلك. بالإضافة إلى ذلك، يمكن اختيار أقصى تباعد بين الفواصل لتقليل حركة الفاصل إلى أدنى حد ومن ثم تعظيم تحويل الأحمال.

المعايير اللازمة لتصميم الرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل والتي تنطبق على تصميم كل من حديد التسليح الطولي والمستعرض هي كما يلي:

- طول البلاطة: يشير هذا إلى تباعد أو مسافة الفاصل، L (قدم)، بين الفواصل المستعرضة الحرة. وهو اعتبار مهم في التصميم لأنه له تأثير كبير على أقصى إجهادات الشد للخرسانة وبالتالي كمية حديد التسليح المطلوبة. وبسبب هذا التأثير، فإن طول البلاطة (تباعد الفواصل) يعد عاملًا مهمًا يجب مراعاته في تصميم أي رصف خرساني مسلح ذو فواصل.
- الإجهاد العامل للحديد: يشير هذا إلى الإجهاد العامل المسموح به، f_s (رطل لكل بوصة مربعة)، في حديد التسليح. نموذجيًا، تُستخدم قيمة تعادل ٧٥ ٪ من قوة خضوع الحديد للإجهاد العامل. بالنسبة للحديد من الدرجة ٤٠ والدرجة ٦٠، فإن الإجهاد

العامل المسموح به هو ٢٠٦ و ٣١٠ ميجا باسكال (٣٠ ألف و ٤٥ ألف رطل لكل بوصة مربعة)، على التوالي. بالنسبة لنسيج الأسلاك الفولاذية الملحومة (WWF) ونسيج الأسلاك الفولاذية المُحزَّزة (DWF)، تبلغ قوة خضوع الحديد ٤٤٨ ميجا باسكال (٦٥ ألف رطل لكل بوصة مربعة) والإجهاد العامل المسموح به ٣٣٦ ميجا باسكال (٤٨,٧٥٠ رطل لكل بوصة مربعة). وينبغي أن يكون الحد الأدنى لمقاس السلك الفولاذي كافياً بحيث لا يكون للتآكل المحتمل بفعل الصدأ تأثير كبير على المقطع العرضي.

- معامل الاحتكاك :يمثل هذا العامل، F، المقاومة الاحتكاكية بين قاع البلاطة الجزء العلوي لطبقة الأساس أو طبقة ما تحت الأساس، وهو بشكل أساسي يعادل معامل الاحتكاك. ويعرض الجدول (٦-٤) القيم الموصى بها للقاعدة الترابية الطبيعية ومختلف مواد طبقة ما تحت الأساس.

الجدول (٦–٤) بعض قيم المدى النموذجية لعامل فقدان الدعم (LS) لأنواع مختلفة من المواد (AASHTO, 1993).

نوع المادة تحت البلاطة	معامل الاحتكاك (F)
معالجة سطحية	٢,٢
تثبيت بالجير	١,٨
تثبيت بالأسفلت	١,٨
تثبيت بالأسمنت	١,٨
حصى النهر	١,٥
صخور مكسرة	١,٣٥
حجر رملي	١,٢
قاعدة ترابية طبيعية	٠,٩

يمكن استخدام حديد تسليح بدرجة أعلى وفقًا للمواصفة (SASO ASTM A615). يمكن أيضًا استخدام قضبان البوليمر المقواة بالألياف الزجاجية (GFRB) وفقًا للمواصفات (SASO ASTM D7957) و (ACI 440.11) و (ACI 440.1R) و (AASHTO 2018).

٦-٨-١-٣-٢ الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح:

يُعد حديد التسليح الطولي عنصر التسليح الرئيس في الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح (CRCP) والذي يكون في الأساس "مستمرًا" على طول الرصف. ويستخدم حديد التسليح الطولي هذا للتحكم في الشقوق التي تتشكل في الرصف نتيجة التغيرات في حجم الخرسانة. ويمكن أن يكون حديد التسليح عبارة عن قضبان تسليح أو نسيج أسلاك فولاذية مُحزَّزة. إن تقييد الخرسانة بسبب حديد التسليح واحتكاك طبقة ما تحت الأساس هو ما يتسبب في تكسر الخرسانة. ويلزم تحقيق توازن بين خواص الخرسانة وحديد التسليح من أجل أن يكون أداء الرصف مُرضيًا. إن تقييم هذا التفاعل يُشكِّل عنصرًا أساسيًا في تصميم التسليح الطولي.

والغرض من حديد التسليح العرضي في الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح يتمثل في السيطرة على عرض أي شقوق طولية يمكن أن تتشكل. يمكن أن تنتفي الحاجة لاستخدام حديد التسليح العرضي مع الرصفيات الخرسانية المسلحة باستمرار والتي أظهرت التجارب المرصودة للرصف الخرسانية مع نفس التربة وأنواع الركام وما شابه ذلك أنه من المستبعد تعرضها لكسر طولي. غير أنه في حالة تعرض الرصف لكسر طولي، فعندئذٍ يُستخدم حديد التسليح العرضي لتقييد الحركة الجانبية وخفض الآثار الضارة للحافة غير المُثبّتة إلى الحد الأدنى. ينبغي تصميم التعزيز المستعرض بناءً على نفس المعايير والمنهجية المستخدمة للرصف ذات الفواصل.

وترد فيما يلي المعايير المطلوبة لتصميم حديد التسليح الطولي في الرصفيات الخرسانية المسلحة باستمرار:

- قوة الشد للخرسانة. يُستخدم مقياسان لقياس قوة الشد للخرسانة. يُستخدم معامل التمزق (أو مقاومة الانحناء) المشتق من اختبار عارضة الانحناء (مع نقطة ثالثة للتحميل) لتحديد سُمك البلاطة المطلوب. ويعتمد تصميم حديد التسليح على مقاومة الشد المُشتقة من اختبار الشد غير المباشر والذي تتضمنه مواصفة الاختبار (AASHTO T198) ومواصفة الاختبار (ASTM C496). وينبغي استخدام القوة عند ٢٨ يومًا لكل من هاتين القيمتين. كما ينبغي -أيضًا- أن يكون هناك اتساق بين كلتا القوتين. وفي طريقة التصميم هذه، عادةً ما تبلغ مقاومة الشد غير المباشرة حوالي ٨٦٪ من معامل تمزق الخرسانة.
- انكماش الخرسانة. يحدث انكماش الخرسانة بفعل الجفاف نتيجةً لفقدان الماء، ويعد أحد العوامل المهمة في تصميم التسليح. وتشمل العوامل الأخرى التي تؤثر على الانكماش كلاً من محتوى الأسمنت و المضافات الكيميائية وطريقة المعالجة والركام وظروف المعالجة. تُستخدم قيمة الانكماش عند ٢٨ يومًا لقيمة الانكماش التصميمية. وتعتمد قيمة كل من الانكماش وقوة

الخرسانة اعتمادًا كبيرًا على نسبة الماء إلى الأسمنت. حيث أن إضافة مزيد من الماء إلى الخلطة سيؤدي إلى زيادة احتمالية الانكماش وتقليل القوة. نظرًا لأن من الممكن اعتبار أن الانكماش يتناسب عكسيًا مع القوة، يمكن استخدام الجدول (٦-٥) كدليل عند اختيار قيمة مقابلة لمقاومة الشد غير المباشرة.

الجدول (٦–٥) العلاقة التقريبية بين الانكماش وقوة الشد غير المباشرة لخرسانة الأسمنت البورتلاندي (AASHTO, 1993).

قوة الشد غير المباشرة	الانكماش (بوصة / بوصة)
٢ ميجا باسكال (٣٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) (أو أقل)	٠,٠٠٠٨٠
٢,٧٥ ميجا باسكال (٤٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,٠٠٠٦٠
٣,٤٥ ميجا باسكال (٥٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,٠٠٠٤٥
٤,١٥ ميجا باسكال (٦٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٠,٠٠٠٣٠
٤,٨٣ ميجا باسكال (٧٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) (أو أكثر)	٠,٠٠٠٢٠

- المعامل الحراري للخرسانة. يتفاوت معامل التمدد الحراري للأسمنت البورتلاندي تبعًا لبعض العوامل مثل نسبة الماء إلى الأسمنت وعمر الخرسانة وجودة الخلطة والرطوبة النسبية ونوع الركام المستخدم في الخلطة. في واقع الأمر، فإن نوع الركام الخشن هو التأثير الأكثر أهمية. ويعرض الجدول (٦-٦) القيم الموصى بها للمعامل الحراري لخرسانة أسمنت بورتلاندي (كدالة في نوع الركام).

الجدول (٦–٦) القيم الموصى بها للمعامل الحراري لخرسانة الأسمنت البورتلاندي كدالة في نوع الركام (AASHTO, 1993).

نوع الركام الخشن	المعامل الحراري للخرسانة (10^{-6} / درجة فهرنهايت)
كوارتز	٦,٦
حجر رملي	٦,٥
حصى	٦,٠
جرانيت	٥,٣
بازلت	٤,٨
حجر جيري	٣,٨

- قطر القضيب أو السلك الفولاذي. بشكلٍ عام، تُستخدم القضبان المُحزَّزة رقم ٥ ورقم ٦ للتسليح الطولي في الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح. بينما يكون القضيب رقم ٦ هو الاختيار العملي الأكبر مقاسًا والذي ينبغي استخدامه في الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح لتلبية متطلبات الترابط والتحكم في عروض الشقوق. علمًا بأن الرسوم البياني (مونوغراف، nomograph) للتصميم الخاصة بالتسليح تجعل اختيار القضيب مقتصرًا على المدى من رقم ٤ إلى رقم ٧. ويحتسب القطر الاسمي لقضيب التسليح بالبوصة عن طريق قسمة رقم القضيب على العدد ٨. وينبغي أن يكون قطر السلك الفولاذي كبيرًا بدرجة كافية لكيلا يؤدي التآكل المحتمل بسبب الصدأ إلى تقليل قطر المقطع العرضي بشكلٍ كبير. وينبغي أيضًا أن تتوافق العلاقة بين الأسلاك الفولاذية الطولية والعرضية مع توصيات الشركات المصنعة.
- المعامل الحراري للحديد. إذا لم يكن المعامل الحراري لحديد التسليح معلومًا بشكل محدد، فيمكن عندئذٍ افتراض قيمة (٥×10^{-6} بوصة/بوصة/درجة فهرنهايت) لأغراض التصميم.
- انخفاض درجة الحرارة التصميمية. يُعرَّف انخفاض درجة الحرارة المستخدم في تصميم التسليح بأنه الفرق بين متوسط درجة حرارة معالجة الخرسانة وأدنى درجة حرارة تصميمية. يمكن تعريف متوسط درجة حرارة المعالجة للخرسانة على أنه متوسط درجة الحرارة القصوى يوميًا طوال الشهر الذي من المتوقع إنشاء الرصف خلاله. ويعبر هذا المتوسط عن حرارة التجفيف. تُعرف أدنى درجة حرارة تصميمية على أنها متوسط درجة الحرارة اليومية الدنيا لأكثر الشهور برودة خلال عمر الرصف. يُحتسب الانخفاض في درجة الحرارة التصميمي المتضمن في طريقة تصميم التسليح الطولي كما يلي:

$$DT_D = T_H - T_L$$ **المعادلة (٦-٤)**

حيث:

DT_D = الانخفاض في درجة الحرارة التصميمي، درجة فهرنهايت.

T_H = متوسط درجة الحرارة القصوى اليومية خلال شهر إنشاء الرصف، درجة فهرنهايت.

TL = متوسط درجة الحرارة اليومية الدنيا خلال الشهر الأبرد من السنة، درجة فهرنهايت.

- معامل الاحتكاك. إن معايير اختيار معامل الاحتكاك المبني على البلاطة للرصف الخرساني المسلح المستمر التسليح هي نفسها المنطبقة على الرصفيات ذوات الفواصل.

٦-٨-٢ تصميم الرصف الصلب:

٦-٨-٢-١ استنباط المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية:

تتمثل الخطوة الأولى من تصميم الرصف الصلب في تقدير المستويات المحتملة والتي يمكن توفيرها لدعم البلاطة. ويتحقق ذلك عن طريق استخدام الجدول (٦-٧) والأشكال من الشكل (٦-٢) إلى الشكل (٦-٥) لاستنباط المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية، (k).

ونظرًا لاعتماد قيمة (k) الفعالة على عدة عوامل مختلفة إلى جانب معامل مرونة القاعدة الترابية، فإن الخطوة الأولى هي تحديد التوليفات (أو المستويات) التي يلزم مراعاتها وتضمينها في عنوان الجدول (٦-٧).

١- أنواع طبقات ما تحت الأساس. للأنواع المختلفة من طبقات ما تحت الأساس قيمًا مختلفة للقوة والمعاملات. إذ أن مراعاة نوع طبقة ما تحت الأساس عند تقدير قيمة (k) الفعالة يشكل أساسًا لتقييم الفعالية من حيث التكلفة كجزء من عملية التصميم.
٢- سُمك طبقة ما تحت الأساس (بوصة). ينبغي أيضًا تحديد السماكة التصميمة المحتملة لكل نوع من أنواع طبقات ما تحت الأساس، بحيث يمكن أن يتسنى النظر في فعاليتها من حيث التكلفة.
٣- فقدان الدعم، LS. يستخدم هذا العامل لتصحيح قيمة (k) الفعالة استنادًا إلى التجريف المحتمل لمواد طبقة ما تحت الأساس.
٤- عمق الأساس الصلب (بالقدم). إذا كانت القاعدة الصخرية غائرة ضمن مسافة ٣ أمتار (١٠ أقدام) من سطح القاعدة الترابية على امتداد أي طول جوهري بموقع تنفيذ المشروع، فعندئذٍ ينبغي مراعاة تأثيرها على قيمة (k) الإجمالية وسماكة البلاطة التصميمية لهذا المقطع.

لكل توليفة من هذه العوامل التي من المقرر تقييمها، فإن من الضروري إعداد جدول منفصل وتطوير معامل فعال لرد فعل القاعدة الترابية يكون مناظرًا.

وتتمثل الخطوة الثانية من العملية في تحديد قيم معامل المرونة الموسمي للقاعدة الترابية وإدراجها في العمود ٢ من كل جدول. وكما سبق، إذا كان أقصر موسم أمده نصف شهر، فعندئذٍ يجب تحديد جميع الفصول في الجدول كفترات نصف شهرية متتالية.

وتتمثل الخطوة الثالثة في تقدير قيمة (k) الفعالة في تخصيص قيم معامل المرونة (E_{SB}) لطبقة ما تحت الأساس لكل موسم. وينبغي إدراج تلك القيم في العمود ٣ من الجدول (٦-٧) والتي يلزم أن تكون مناظرة لتلك القيم المخصصة للمواسم والمستخدمة لتطوير قيم معامل مرونة للقاعدة الترابية. وبالنسبة لأنواع مواد طبقات ما تحت الأساس غير المتأثرة بتغير الفصول (كالمواد المعالجة بالأسمنت على سبيل المثال)، فيمكن تخصيص قيمة ثابتة لمعامل طبقة ما تحت الأساس لكل موسم. وبالنسبة للمواد غير المترابطة، فينبغي ألا تزيد نسبة طبقة ما تحت الأساس إلى معامل مقاومة القاعدة الترابية عن القيمة ٤، وذلك لتفادي حدوث أي ظروف اصطناعية.

الجدول (٦–٧) جدول لتقدير المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية (AASHTO, 1993).

طبقة ما تحت الأساس التجريبية:	النوع _____ السمك (بوصة) _____ فقدان الدعم (LS) _____		عمق الأساسات الصلبة (قدم) _____ سمك البلاطة المتوقع (بوصة) _____		
(١)	(٢)	(٣)	(٤)	(٥)	(٦)
الشهر	معامل القاعدة الترابية، (M_R) (رطل لكل بوصة مربعة)	معامل طبقة ما تحت الأساس، (E_{SB}) (رطل لكل بوصة مربعة)	(قيمة-k) للمعامل المركب (رطل لكل بوصة مكعبة) (الشكل ٦-٣)	(قيمة-k) (رطل لكل بوصة مكعبة) للأساسات الصلبة (الشكل ٦-٤)	التلف النسبي، (u_r) (الشكل ٦-٥)

يناير					
فبراير					
مارس					
أبريل					
مايو					
يونيو					
يوليو					
أغسطس					
سبتمبر					
أكتوبر					
نوفمبر					
ديسمبر					
المتوسط: $\overline{u_r} = \frac{\sum u_r}{n} =$				المجموع: Σu_r	
المعامل الفعال لرد فعل للقاعدة الترابية، (k) (رطل لكل بوصة مكعبة) = _____					
فقدان الدعم المصحح: k (رطل لكل بوصة مكعبة) = _____					

وتتمثل الخطوة الرابعة في تقدير المعامل المركب لرد فعل القاعدة الترابية عن كل موسم بافتراض أن عمق القاعدة الترابية شبه لا نهائي (أن العمق وصولاً إلى القاعدة الصخرية يزيد عن ١٠ أقدام)، ثم إدراجه في العمود ٤. ويتحقق ذلك بالمساعدة التي يوفرها الشكل (٦-٢). وتكون نقطة البداية في هذا الرسم التخطيطي هي سماكة طبقة ما تحت الأساس، (D_{SB}). إذا وُضعت البلاطة فوق القاعدة الترابية مباشرة (بدون طبقة ما تحت الأساس)، فعندئذٍ يُعرف المعامل المركب لرد فعل القاعدة الترابية باستخدام العلاقة النظرية التالية بين قيم (k) المستمدة من اختبار لوح التحميل وبين معامل المرونة للقاعدة الترابية:

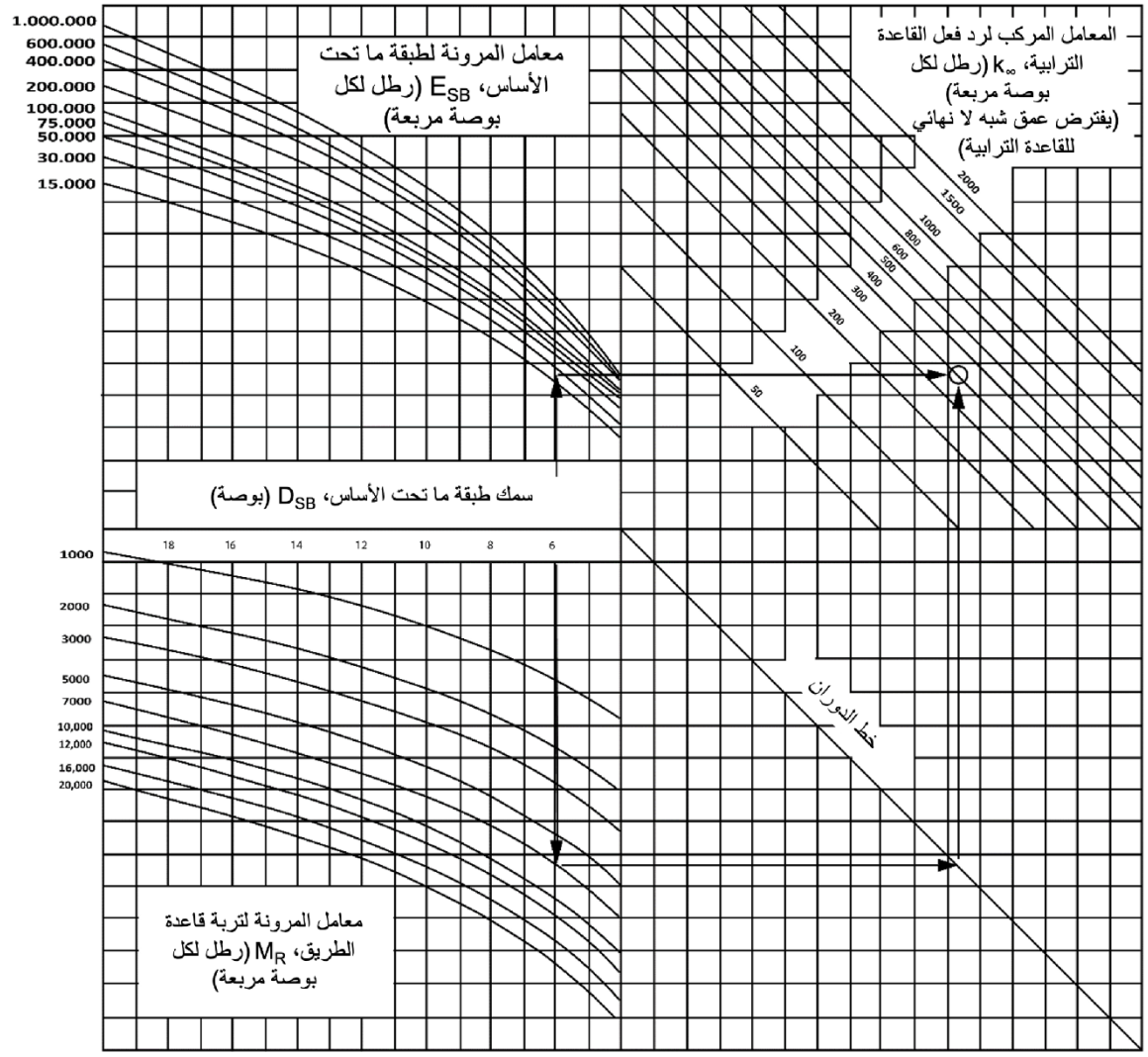
المعادلة (٦-٥) $$k = {M_R}/{19.4}$$

تتمثل الخطوة الخامسة في تطوير (قيمة-k) والتي تتضمن تأثير الأساسات الصلبة بالقرب من السطح. وينبغي تجاهل تلك الخطوة إذا كان عمق الأساس الصلب يزيد عن ٣ أمتار (١٠ أقدام). ويعرض الشكل (٦-٣) الرسم البياني الذي يمكن استخدامه لتقدير (قيمة-k) المعدلة لكل موسم. إذ أنه يراعي معامل مرونة القاعدة الترابية والمعامل المركب لرد فعل القاعدة الترابية، بالإضافة إلى عمق الأساسات الصلبة. وينبغي لاحقًا تسجيل جميع قيم-k المعدلة في العمود ٥ من الجدول (٦-٧).

وتتمثل الخطوة السادسة في تقدير سماكة البلاطة التي ستكون مطلوبة ومن ثم استخدم الشكل (٦-٤) لتحديد التلف النسبي (u_r) في كل موسم في العمود ٦ من الجدول (٦-٧).

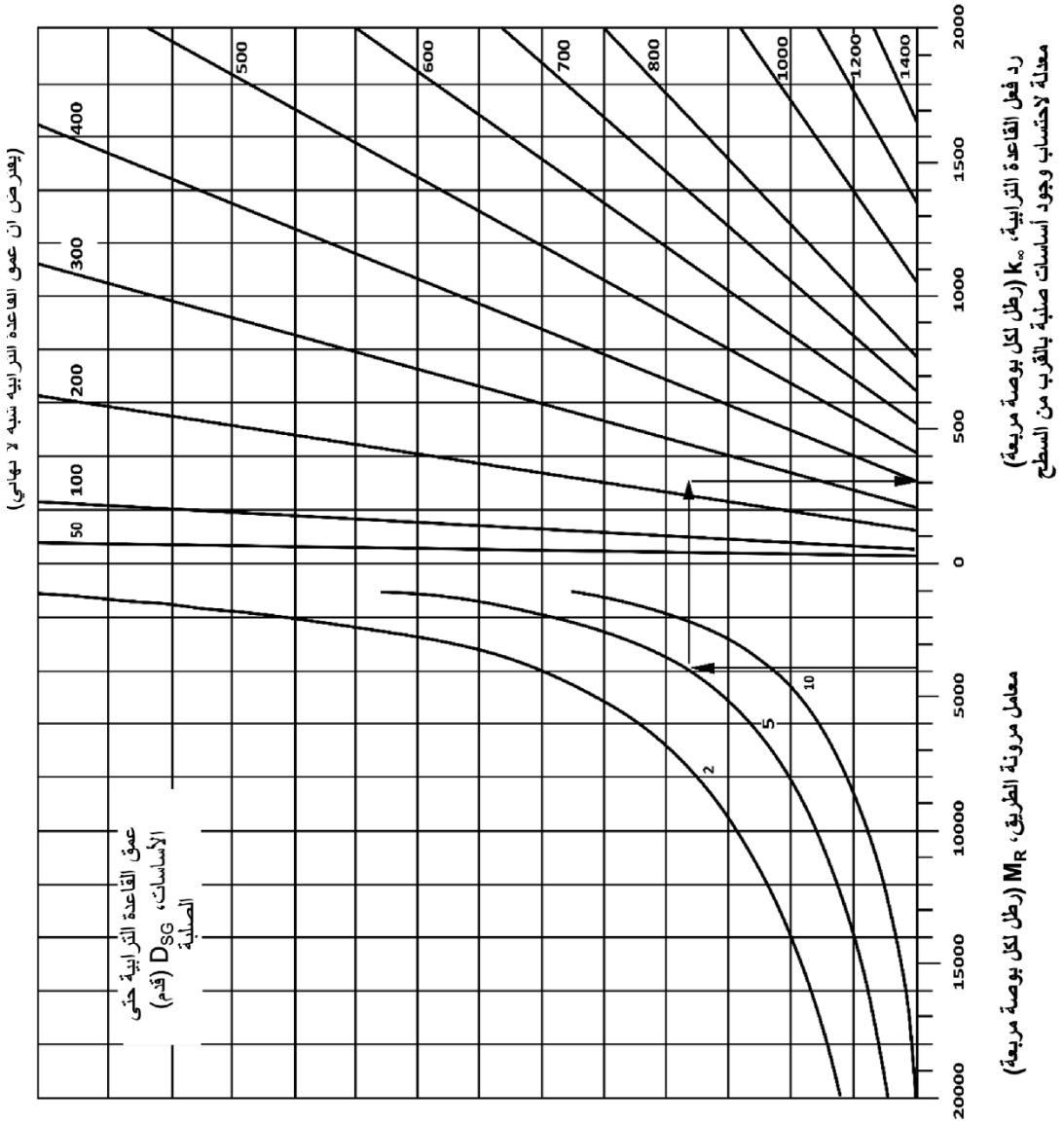
وتتمثل الخطوة السابعة في جمع جميع قيم التلف النسبي (u_r) (العمود ٦) ثم قسمة الإجمالي على عدد الزيادات الموسمية (١٢ أو ٢٤) بهدف تحديد متوسط التلفيات النسبي (u_r). وبالتالي فإن المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية، هو القيمة المقابلة لمتوسط التلف النسبي (وسماكة البلاطة المتوقع) في الشكل (٦-٤).

وتتمثل الخطوة الثامنة والأخيرة في تعديل المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية بهدف الأخذ في الحسبان فقدان الدعم المحتمل نتيجة تجريف طبقة ما تحت الأساس. ويوفر الشكل (٦-٥) رسمًا بيانياً لتصحيح المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية استنادًا إلى عامل فقدان الدعم، (LS).

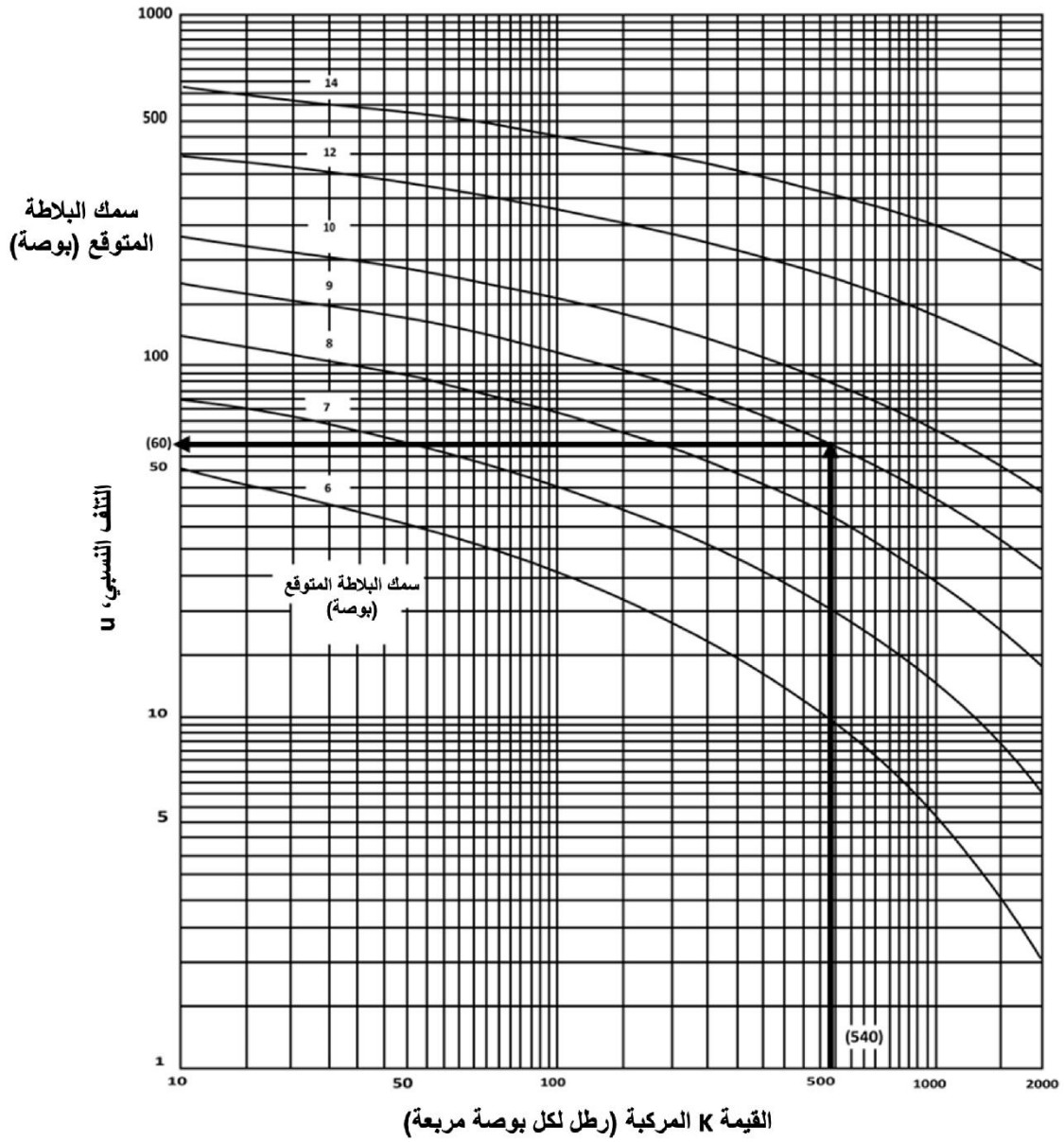


الشكل (٦–٢) رسم بياني لتقدير المعامل المركب لرد فعل القاعدة الترابية، k، بافتراض أن عمق القاعدة الترابية شبه لا نهائي (AASHTO, 1993).

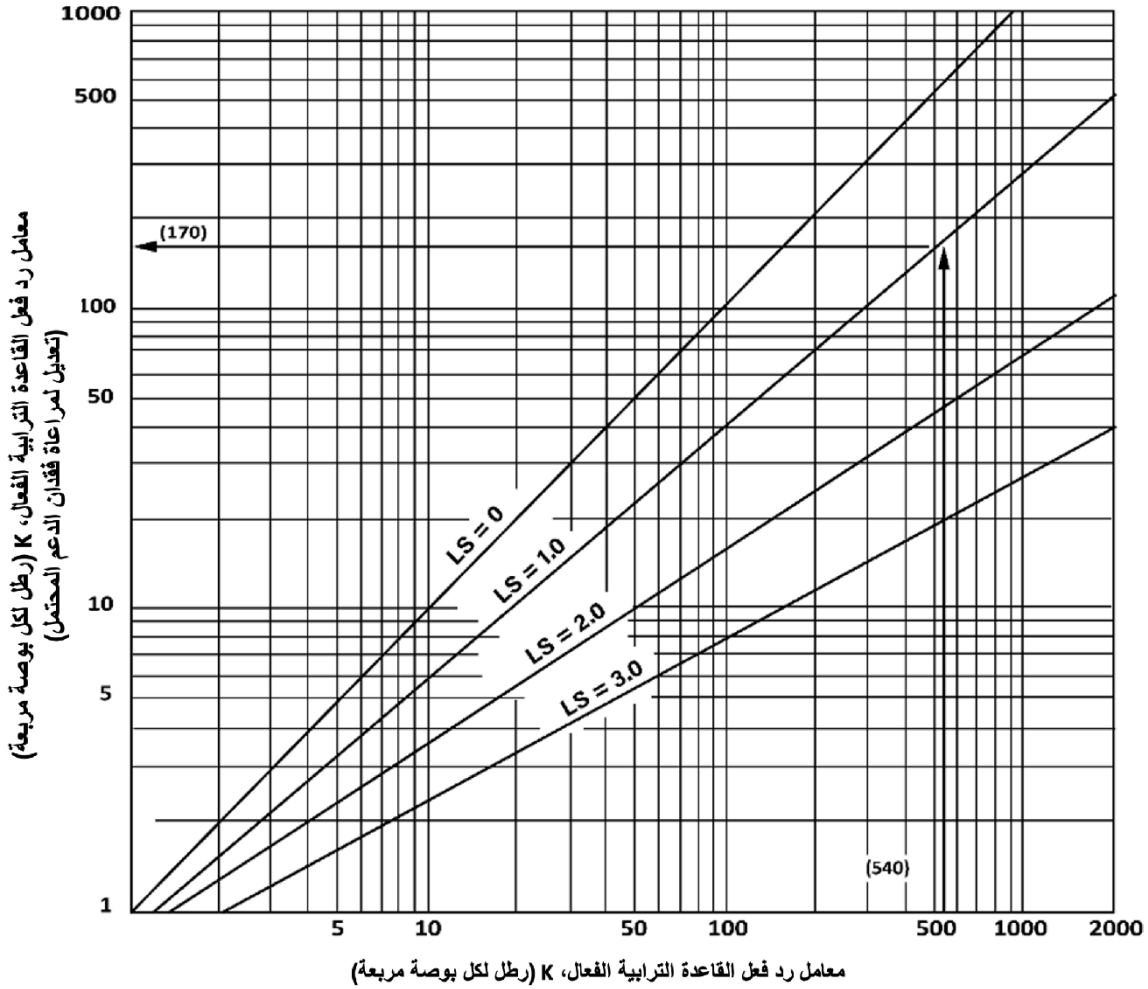
(وتحقيقًا لأغراض عملية، يفترض أن العمق شبه اللانهائي يزيد عن ٣ أمتار (١٠ أقدام) تحت سطح القاعدة الترابية).



الشكل (٦–٣) رسم بياني لتحسين معامل رد فعل القاعدة الترابية لمراعاة تأثيرات الأساسات الصلبة بالقرب من السطح ضمن حدود ٣ أمتار (١٠ أقدام) (AASHTO, 1993).



الشكل (٦–٤) رسم بياني لتقدير التلف النسبي للرصفيات الصلبة بناء على سُمك البلاطة ودعاماتها (AASHTO, 1993).

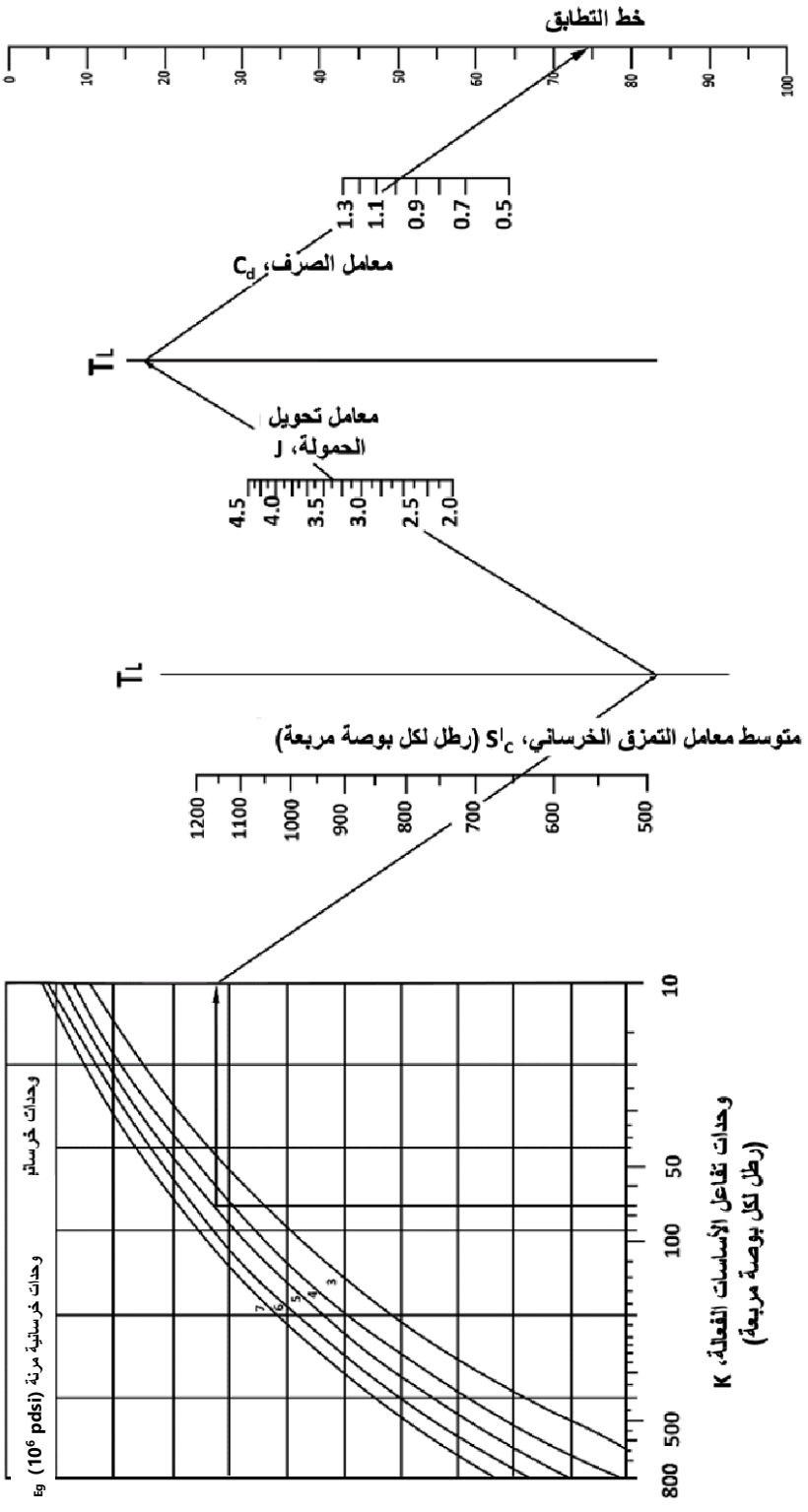


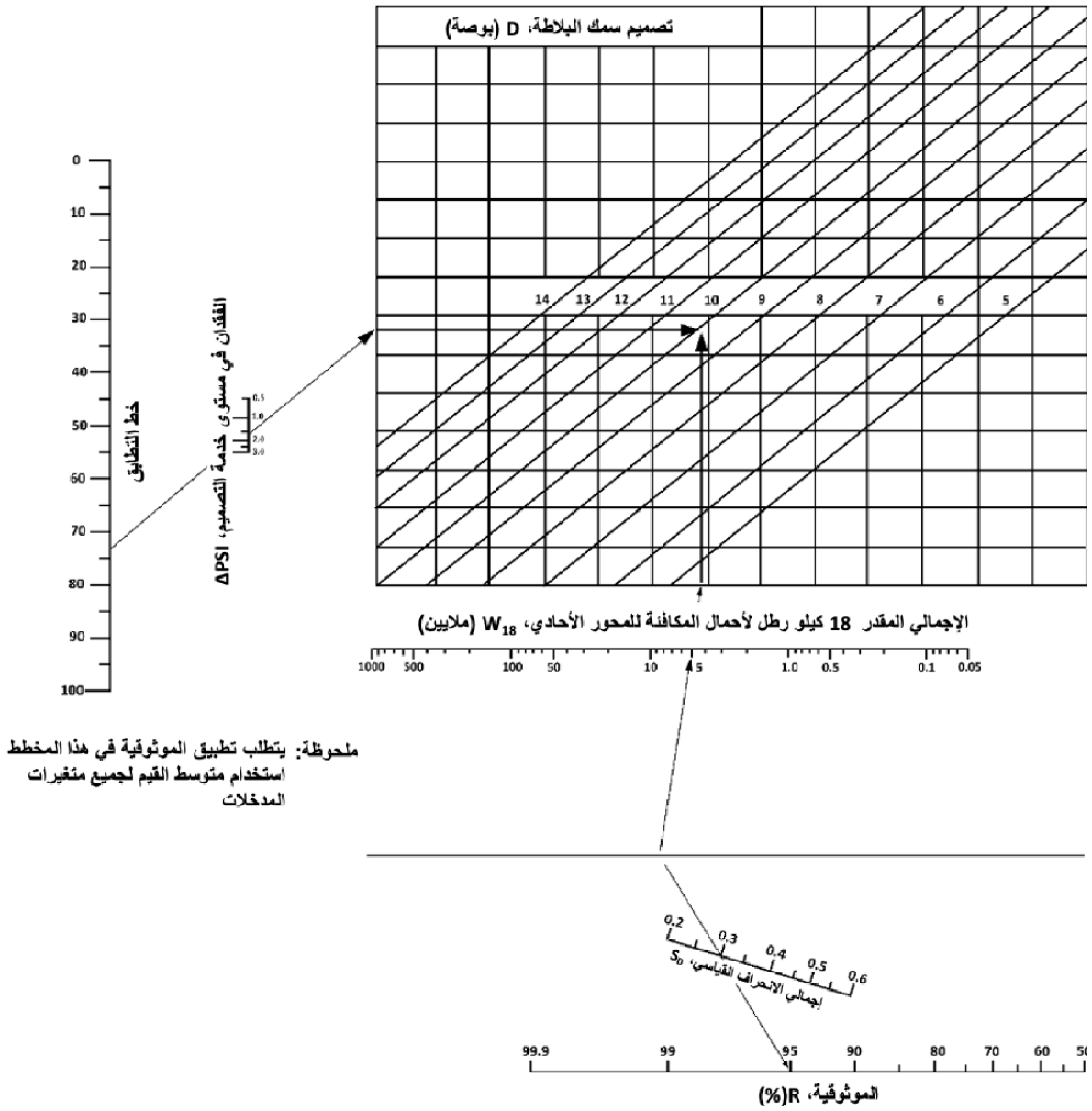
الشكل (٦–٥) تصحيح معامل رد فعل القاعدة الترابية لفاقد دعم طبقة ما تحت الأساس المحتمل (AASHTO, 1993).

٦-٨-٢-٢ تحديد سُمك البلاطة المطلوب:

يعرض الشكل (٦-٦)، في جزئين، الرسم البياني المستخدم لتحديد سماكة البلاطة لكل (قيمة-k) فعالة حُددت في القسم الفرعي السابق. وحينئذٍ، يمكن للمصمم اختيار التوليفة المثلى لسماكة البلاطة وطبقة ما تحت الأساس بناءً على الوضع الاقتصادي والمتطلبات الأخرى التي تستلزمها السياسة العامة للجهة. وبشكلٍ عام، تُقرب سماكة الطبقة لأقرب بوصة، غير أن استخدام فرّادات (paver) الأسفلت بنظام الشدّات المنزلقة المحكومة يمكن أن يتيح زيادات تصل كل منها إلى (٢/١) بوصة. وإلى جانب (قيمة-k) للتصميم، فإن المدخلات الأخرى المطلوبة في الرسم البياني (nomograph) لتصميم الرصف الصلب تتضمن ما يلي:

١- المرور المستقبلي المقدر (w_{18}) لفترة الأداء. (w_{18}) هي دالة في عمق البلاطة (D). وهذه طريقة تصميم بالتجربة والخطأ. ولذا، يُفترض العمق الأولي للبلاطة بهدف احتساب مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL). وتتكرر هذه العملية حتى تتطابق سماكة البلاطة المحسوبة مع السماكة المفترضة.
٢- الموثوقية، R.
٣- الانحراف المعياري الكلي، S_o.
٤- الفاقد في موثوقية التصميم، ($\Delta PSI = p_i - p_t$).
٥- معامل مرونة الخرسانة (E_c).
٦- معامل تمزق الخرسانة (S_c').
٧- معامل تحويل الأحمال (J).
٨- معامل الصرف (C_d).


خط التطابق
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
1.3
1.1
0.9
0.7
0.5
معامل الصرف، C_d
T_L
معامل تحويل
الحمولة، J
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
T_L
متوسط معامل التمزق الخرساني، S'_c (رطل لكل بوصة مربعة)
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
وحدات خرسانة مرنة (10^6 psi) E_g
وحدات خرسانية مرنة
وحدات خرسانة
7
6
5
4
3
10
50
100
500
800
وحدات تفاعل الأساسات المقاومة، K
(رطل لكل بوصة مربعة)



الشكل (٦–٦) رسم بياني تصميمي للرصفيات الصلبة مبني على استخدام القيم المتوسطة لكل متغير من المدخلات (AASHTO, 1993).

يمكن تلخيص هذه الطريقة في الخطوات التالية:

١- عرّف (قيمة-k) التصميمية لمعامل رد فعل القاعدة الترابية الفعال.
٢- احسب عدد مرات تطبيق مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) للمسار التصميمي.
٣- اختر مستوى الموثوقية (R) (٪) من الجدول (٥-٧).
٤- اختر الانحراف المعياري الكلي (S_o) (الجزء ٦-٥).
٥- عرّف (ΔPSI) وفق المعادلة (٥-١).
٦- حدد كلًا من معامل المرونة ومعامل التمزق للخرسانة.
٧- حدد عامل تحويل الأحمال (J) من الجدول (٦-٢).
٨- حدد عوامل معامل الصرف من الجدول (٦-١).

٩- حدد سمك بلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي من الشكل (٦-٦).
١٠- حدد القطاع العرضي النهائي للرصف.

٦-٨-٣ تصميم فواصل الرصف الصلب:

يغطي هذا الجزء الفرعي الاعتبارات التصميمية للأنواع المختلفة من الفواصل في رصفيات خرسانة الأسمنت البورتلاندي. وتنطبق هذه المعايير على تصميم الفواصل في كل من الرصفيات ذات الفواصل والمستمرة.

٦-٨-٣-١ أنواع الفواصل:

توضع الفواصل في الرصفيات الخرسانية بهدف السماح بتمددها وانكماشها، وبالتالي تخفيف كل من الضغوط الناتجة عن التغيرات البيئية (درجة الحرارة والرطوبة)، والاحتكاك وتسهيل عملية الإنشاء. هناك ثلاثة أنواع عامة من الفواصل، وهي:

١- فواصل الانكماش أو الفواصل المُسطحة الضعيفة (الوهمية) التي توضع بهدف تخفيف إجهاد الشد الناتج عن كل من درجة الحرارة والرطوبة والاحتكاك، وبالتالي السيطرة على التشقق. في حال عدم تركيب فواصل انكماش، من المحتمل حدوث تشقق عشوائي على سطح الرصف.
٢- تتمثل الوظيفة الأساسية لفاصل التمدد في توفير حيز مكاني يسمح بتمدد الرصف، وبالتالي الحيلولة دون حدوث إجهادات ضغط والتي قد تؤدي إلى انحناء الرصف.
٣- فواصل الإنشاء مطلوبة بهدف تسهيل عملية الإنشاء. يُحدد التباعد بين الفواصل الطولية بناءً على كل من عرض مُعدّة الرصف وسماكة الرصف.

ويؤخذ في الاعتبار هندسة الفواصل (الجيومترية) من حيث تباعدها ومخططها العام.

٦-٨-٣-١-١ تباعد الفواصل:

بشكلٍ عام، يعتمد التباعد بين فواصل الانكماش العرضية والطولية على الظروف المحلية للمواد والبيئة، في حين أن فواصل التمدد وفواصل الإنشاء تعتمد بصورة أساسية على مخططها العام والإمكانيات الإنشائية. بالنسبة لفواصل الانكماش، يقل التباعد المطلوب لمنع التشقق الوسطي مع زيادة كل من المعامل الحراري أو التغير في درجة الحرارة أو مقاومة احتكاك طبقة ما تحت الأساس؛ في حين يزداد التباعد مع زيادة مقاومة الشد للخرسانة. ويرتبط التباعد -أيضًا- بسماكة البلاطة وإمكانيات العوازل في الفواصل. وكدليل تقريبي، فإن تباعد الفواصل (بالأقدام) للرصفيات الخرسانية العادية ينبغي ألا يتجاوز ضعف سماكة البلاطة (بالبوصة). وكمبدأ توجيهي عام أيضًا، ينبغي ألا تتجاوز نسبة عرض إلى طول البلاطة (١,٢٥).

وبشكلٍ عام، يُقلل استخدام فواصل التمدد في المشروع إلى أدنى حد بسبب قضايا التكلفة والتعقيد والأداء. غير أنها تستخدم في الهياكل الإنشائية التي تتغير فيها أنواع الرصفيات (على سبيل المثال، من رصفيات خرسانة مسلحة مستمرة التسليح (CRCP) إلى رصفيات ذات فواصل)، وذلك في الرصفيات سابقة الإجهاد وعند التقاطعات.

ويُحدد التباعد بين فواصل الإنشاء بشكلٍ عام من قبل صب الخرسانة الميداني وإمكانيات المعدات المستخدمة. وينبغي وضع فواصل إنشاءات طولية عند حواف المسارات بهدف تعظيم نعومة الرصف وتقليل مشاكل تحويل الأحمال إلى أدنى حد ممكن. تحدث فواصل الإنشاء المستعرضة عند نهاية صب الخرسانة توظيف في نهاية اليوم أو فيما يتعلق بأعطال المعدات.

٦-٨-٣-١-٢ المخطط العام للفواصل:

إن الالتواء والتوزيع العشوائي للفواصل يقلل تأثير خشونة الفاصل إلى أدنى حد، وبالتالي ت جودة الركوب على الرصف.

كما أن الفواصل الملتوية ستُحسن من أداء الفاصل وتمد في عمر الرصفية الصلبة، أي العادية أو المسلحة، سواءً بقضبان وتدية أو بدونها. يُلوى الفاصل بدرجة كافية بحيث تعبر أحمال العجلات لكل محور فوق الفاصل عجلة في كل مرة. ينبغي أن توضع الزاوية المنفرجة عند حافة الرصف الخارجية قبل الفاصل في اتجاه حركة المرور نظرًا لأن ذلك الركن هو الذي يتلقى الارتطام الأكبر من المرور المفاجئ لأحمال العجلات. تتميز الفواصل الملتوية بالمزايا التالية:

- خفض الانحراف والإجهادات عند الفواصل، وبالتالي زيادة قدرة البلاطة على تحمل الأحمال وتمديد عمر الرصف.
- رد فعل أقل للارتطام في المركبات أثناء عبورها على الفواصل، وبالتالي زيادة نعومة الركوب حال وجود قدر من الخشونة في الفواصل.

ويعد استخدام فواصل ملتوية في مسافات تباعد عشوائية أو غير منتظمة من التعزيزات الأخرى لتحسين أداء الرصفيات العادية. إذ أن أنماط التباعد العشوائية تحول دون الاستجابات الإيقاعية أو الرنانة في المركبات التي تسير بالسرعات الطبيعية للطرق الريفية السريعة. وقد أشارت الأبحاث التي أجريت على طريق اختبار للمركبات إلى أنه ينبغي تجنب أنماط تباعد البلاطات التي تبلغ (٢,٣) م (٧,٥ قدم).

٦-٨-٣-١-٣ أبعاد الفواصل:

ينبغي أن يكون عمق فواصل الانكماش ملائمًا بما يضمن حدوث التشقق بالموقع المرغوب وليس بنمطٍ عشوائي. عادة، ينبغي أن يكون عمق فواصل الانكماش المستعرضة ينبغي أن تكون رُبع (¼) سماكة البلاطة وعمق الفواصل الطولية ثُلث (٣/١) سماكة البلاطة. ويمكن تطوير هذه الفواصل عن طريق القطع بالمنشار أو الحشو أو التشكيل. ويكتسي توقيت القطع بالمنشار بأهمية بالغة لمنع التشقق غير المحكوم، كما ينبغي تقطيع الفواصل بالمنشار تتابعيًا لضمان بدئها بأداء وظيفتها في آنٍ واحد. علمًا بأن طول الوقت المنقضي منذ وضع الخرسانة حتى القطع بالمنشار سيتغير على مدار اليوم تبعًا لتغير كل من درجات حرارة البلاطة وظروف المعالجة ونسب الخلط.

٦-٨-٣-٢ أبعاد عوازل الفواصل:

٦-٨-٣-٢-١ فواصل الانكماش:

يجب تعظيم حركة الفاصل وقدرات العوازل به. وبشكلٍ عام، ينبغي زيادة جودة مواد العوازل مع زيادة الحركة المتوقعة للفاصل. وقد تكون زيادة حركة الفاصل ناتجة عن استخدام بلاطة أطول، ارتفاع التغير في درجة الحرارة و/أو ارتفاع المعامل الحراري للخرسانة.

وتتأثر حركة الفواصل في الرصفيات بعوامل مثل تغير طول البلاطة وتغير الخصائص الحجمية للخرسانة، ومدى درجات حرارة البلاطة والاحتكاك بين البلاطة وطبقة ما تحت الأساس (أو القاعدة الترابية). بسبب احتكاك القاعدة الترابية والمقيدات الطرفية فإن التغييرات في عرض الفاصل تكون أقل مما يمكن توقعه بسبب الانكماش والتمدد الحراري البسيط.

من أجل الحفاظ على عازل مصبوب في الموقع فعّال، يجب أن يتمتع مكمن العازل بعامل تشكيل مناسب (نسبة العمق إلى العرض). في إطار الحدود العملية للحد الأدنى لعمق الفاصل، ينبغي أن يكون المكمن مربع الشكل قدر الإمكان وأن يكون غائرًا تحت السطح بمقدار ٣ مم (٨/١ بوصة) كحد أدنى. وهذا يعني أن مكمن العازل يجب -عادةً- أن يُشكل عن طريق زيادة العرض وتقليل عمق الجزء العلوي من الفاصل لتثبيت العازل. أما بالنسبة للمفاصل الضيقة ذات التباعد القريب بين الفواصل، فيمكن تشكيل المكمن عن طريق إدخال سلك أو مادة أخرى إلى عمق محدد مسبقًا. إذ أن هذه الطريقة تقلل من الكمية المطلوبة من عوازل الفواصل. وبشكلٍ عام، ينبغي أن تكون نسبة العمق إلى العرض للعازل في مدى (٢٥ – ٣٧,٥) ملم (من ١ إلى ١,٥ بوصة)، شريطة ألا يقل العمق عن ٩,٥ ملم و ١٢,٥ ملم (٨/٣ و ٢/١ بوصة) للفواصل الطولية والمستعرضة، على التوالي.

ويُعرَّف عرض الفاصل بأنه القيمة القصوى التي يصل إليها عند أدنى درجة حرارة. وبالتالي، فإن القيمة القصوى تشمل الحركة الأفقية المتوقعة بالإضافةً إلى العرض المتبقي بسبب خواص العازل. ويمكن حساب الحركة الأفقية عن طريق مراعاة حالات الفتح والإغلاق الموسمية الناتجة عن دورات درجة الحرارة بالإضافة إلى انكماش الخرسانة. ويعتمد مقدار الفتح والإغلاق على كل من تغير درجة الحرارة الرطوبة والتباعد بين الفواصل أو الشقوق العاملة والاحتكاك بين البلاطة وطبقة الأساس، وحالة أجهزة تحويل أحمال الفاصل وغيرها.

ولأغراض تصميمية، فإنه يمكن حساب متوسط انفتاح الفاصل المستعرض خلال فترة زمنية بطريقة تقريبية. يجب أن يأخذ عرض الفاصل في حسبانه الحركة بالإضافة إلى الإجهاد المتبقي المسموح به في عازل الفاصل، ويمكن حسابه من خلال ما يلي:

المعادلة (٦-٦)

$$\Delta L = \frac{CL(\alpha_c \times DT_D + Z)}{S} \times 100$$

حيث:

ΔL = فتحة الفاصل التي تسببت بها التغيرات في درجات الحرارة والانكماش بفعل الجفاف في خرسانة الأسمنت البورتلاندي، بوصة.

S = الانفعال المسموح به لمادة عازل الفاصل. معظم مواد العوازل الحالية مصممة بحيث تتحمل انفعالات تتراوح من (٢٥٪) إلى (٣٥٪)، وبالتالي يمكن استخدام ٢٥٪ كقيمة مُتحفظة.

α_C = المعامل الحراري لانكماش خرسانة الأسمنت البورتلاندي، درجة فهرنهايت.

Z = معامل الانكماش بفعل الجفاف لبلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي، والذي يمكن إهماله بالنسبة لمشاريع إعادة إغلاق الفاصل بمادة عازلة، بوصة/بوصة.

L = تباعد الفواصل، بوصة.

DT_D = مدى درجات الحرارة، درجة فهرنهايت.

C = عامل التعديل بسبب تقييد احتكاك كل من البلاطة وطبقة ما تحت الأساس. استخدم (٠,٦٥) لطبقة ما تحت الأساس المُثبّتة و (٠,٨٠) لطبقة الأساس الحبيبية.

٦-٨-٣-٢-٢ فواصل التمدد:

ينبغي أن تستند الحركة في فواصل التمدد على الخبرات السابقة التي تمتلكها الجهة. وينبغي تحسين أبعاد مكمن العازل للقدر الأمثل بناءً على الحركة وإمكانيات المواد. وبشكلٍ عام، ستكون الأبعاد أكبر بكثير مقارنةً بفواصل الانكماش.

٦-٨-٣-٢-٣ فواصل الإنشاء:

إن المناقشة المتعلقة بفواصل الانكماش المستعرضة تنطبق -أيضًا- على فواصل الإنشاء وغيرها من الفواصل الطولية الأخرى.

إن تسليح الحديد الموزع على رصف الخرسانة المسلحة لا يستهدف منه منع التشقق، وإنما إحكام إغلاق أي شقوق يمكن أن تتشكل، وبالتالي الحفاظ على الرصف كوحدة إنشائية متكاملة. وتتأثر الميكانيكيا الطبيعية التي من خلالها تتطور الشقوق بما يلي: (١) درجة الحرارة و/أو انكماشات البلاطة بسبب الرطوبة و (٢) مقاومة الاحتكاك من المادة السفلية. وعند انخفض أي من درجة الحرارة أو محتوى الرطوبة، فإن البلاطة تنزع إلى الانكماش. وتقاوم المادة السفلية هذا الانكماش من خلال الاحتكاك وقوى القص بينها وبين البلاطة. ويؤدي تقييد انكماش البلاطة إلى حدوث إجهادات شد تصل إلى أقصى حد عند منتصف البلاطة. وإذا تجاوزت إجهادات الشد هذه قوة الشد للخرسانة، فحينئذٍ يحدث التشقق وتنتقل جميع الإجهادات إلى حديد التسليح. وبالتالي، يلزم أن يكون حديد التسليح مُصممًا بحيث يتحمل تلك الإجهادات دون التعرض لأي استطالة ملحوظة من شأنها أن تؤدي إلى تشققات واسعة العرض.

ونظرًا للاختلافات الجوهرية في متطلبات تسليح الحديد الطولي بين الرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل (JRCP) والرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح (CRCP)، فإن تصميمات حديد التسليح تُعامل بشكلٍ منفصل. ولكن تصميم حديد التسليح المستعرض في الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح يكون مماثلاً بالضبط لتصميم حديد التسليح الطولي والعرضي في الرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل. ويُوصف مقدار التسليح المطلوب كنسبة مئوية من مساحة المقطع العرضي للخرسانة.

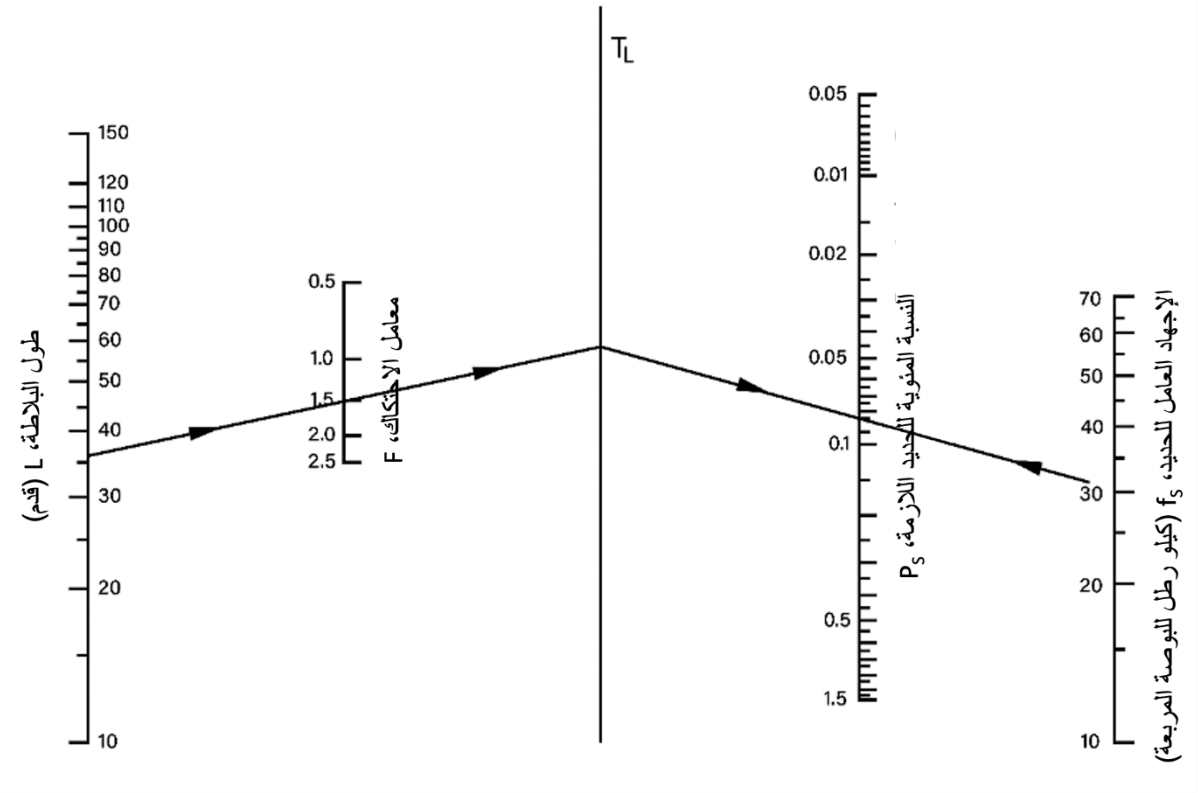
٦-٨-٣-٣ الرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل:

يعرض الشكل (٦-٧) الرسم البياني (nomograph) لتقدير النسبة المئوية المطلوبة من حديد التسليح في الرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل. وفيما يلي المدخلات المطلوبة:

- طول البلاطة، L (القسم الفرعي ٦-٨-١-٣)
- الإجهاد العامل للحديد، f_s (القسم الفرعي ٦-٨-١-٣)
- عامل الاحتكاك، F (القسم الفرعي ٦-٨-١-٣)

وينطبق هذا الرسم البياني على تصميم حديد التسليح المستعرض في كل من الرصفيات الخرسانية ذات الفواصل والمستمرة التسليح، وكذلك على تصميم حديد التسليح الطولي في الرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل. ولا يتوقع عادة حدوث تشققات مستعرضة عندما يقل تباعد الفواصل عن ٣,٦٥ م (١٥ قدمًا)، وبالتالي لن تكون هناك حاجة إلى حديد التسليح.

الرسم البياني يحل المعادلة: $100 \times \frac{LF}{2f_s} = P_S$



الشكل (٦–٧) رسم بياني تصميمي لحديد تسليح الرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل (AASHTO, 1993).

٦-٨-٣-٤ الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح:

هذا القسم الفرعي مخصص لتصميم حديد التسليح الطولي في الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح. يمكن تطبيق طريقة التصميم المعروضة بشكلٍ منهجي باستخدام ورقة العمل المتضمنة في الجدول (٦-٨). في هذا الجدول، وُفر حيّز لإدراج كل من مدخلات التصميم المناسبة والنتائج الوسطية وحسابات تحديد النسبة المئوية المطلوبة من حديد التسليح الطولي. وتُوفر ورقة عمل منفصلة لتنقيحات التصميم، والمعروضة في الجدول (٦-٩). رغم أن الأمثلة تستخدم قضبان التسليح، إلا أن استخدام نسيج الأسلاك الفولاذية المُحزَّزة (DWF) يُعد أحد البدائل المقبولة أيضًا.

وفيما يلي مدخلات التصميم التي تتطلبها هذه الطريقة:

- مقاومة الشد غير المباشر للخرسانة، f_t (القسم الفرعي ٦-٨-١-٣).
- انكماش الخرسانة عند ٢٨ يوم، Z (القسم الفرعي ٦-٨-١-٣).
- المعامل الحراري للخرسانة، α_c (القسم الفرعي ٦-٨-١-٣).
- قطر قضيب التسليح أو سلك التسليح، φ (القسم الفرعي ٦-٨-١-٣).
- المعامل الحراري للحديد، α_s (القسم الفرعي ٦-٨-١-٣).
- الانخفاض في درجة الحرارة التصميمية، DT_D (القسم الفرعي ٦-٨-١-٣).

ينبغي تسجيل هذه البيانات في الحيز المتاح في الجزء العلوي من الجدول (٦-٨).

الجدول (٦–٨) ورقة عمل لتصميم حديد التسليح الطولي (AASHTO, 1993).

مدخلات التصميم				
متغير المدخلات	**القيمة**	**متغير المدخلات**		**القيمة**
قطر قضيب التسليح أو سلك التسليح، φ (بوصة)		نسبة المعامل الحراري، (α_s/α_c) (بوصة/بوصة)		
انكماش الخرسانة، Z (بوصة/بوصة)		الانخفاض في درجة الحرارة التصميمية (DT_D)، درجة فهرنهايت		
قوة الشد للخرسانة، f_t (رطل لكل بوصة مربعة)		إجهاد حمل العجلة، σ_w (رطل لكل بوصة مربعة)		
معايير التصميم والنسبة المئوية المطلوبة من الحديد				
	تباعد الشقوق، $\bar{x}$ (قدم)	عرض الشق المسموح به، CW_{max} (بوصة)	الإجهاد العامل للحديد، $(\sigma_s)_{max}$ (ألف رطل للبوصة المربعة)	
قيمة المعايير المُقيدة	الحد الأقصى ٨,٠ الحد الأدنى ٣,٥			
الحد الأدنى المطلوب من النسبة المئوية للحديد				(P_{min})*
الحد الأقصى المسموح به للنسبة المئوية للحديد				(P_{max})**

* أدخل النسبة المئوية الأكبر عبر الخط

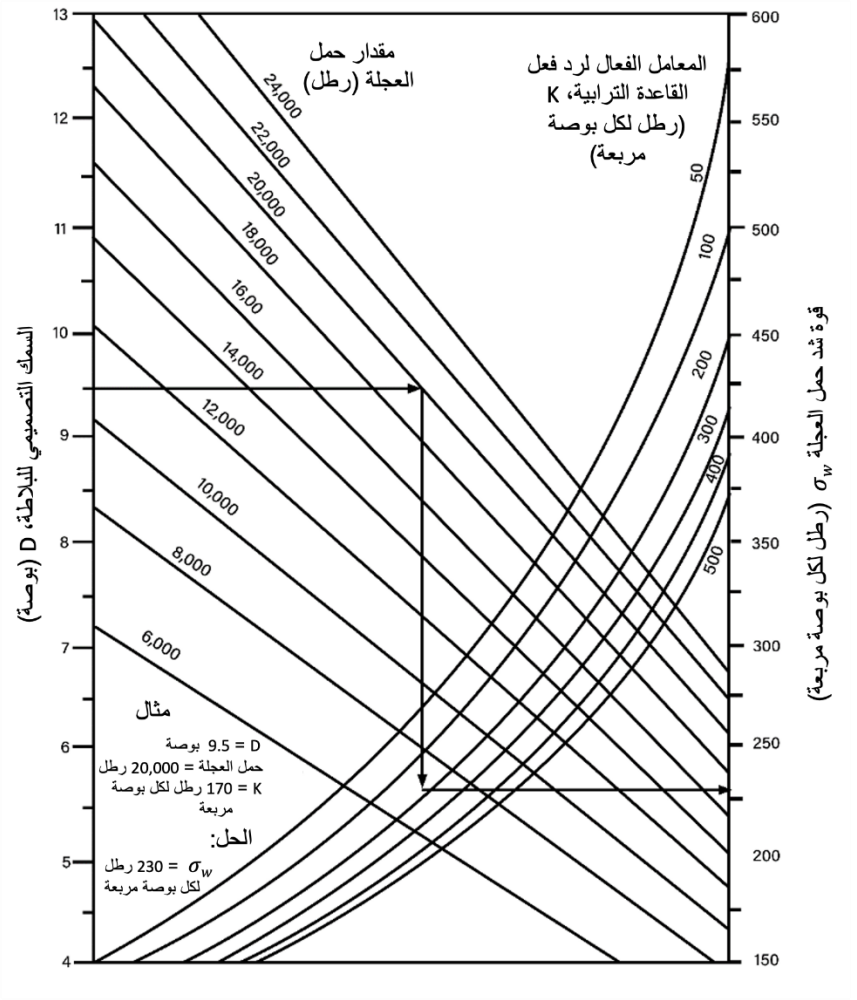
** إذا كان الحد الأقصى المسموح به للنسبة المئوية للحديد (P_{max}) أقل من الحد الأدنى المطلوب من النسبة المئوية للحديد (P_{min})، فعندئذٍ تكون معايير التسليح متضاربة والتصميم غير ممكن.

الجدول(٦–٩) ورقة عمل لتصميم حديد التسليح الطولي المنقح (AASHTO, 1993).

المؤشر	**التغيير في القيمة من المحاولة السابقة**				
	المحاولة ٢	**المحاولة ٣**	**المحاولة ٤**	**المحاولة ٥**	**المحاولة ٦**
قطر قضيب التسليح أو سلك التسليح[٢]، φ (بوصة)					
انكماش الخرسانة، Z (بوصة/ بوصة)					
قوة الشد للخرسانة[٢]، f_t (رطل لكل بوصة مربعة)					
إجهاد حمل العجلة، σ_w (رطل لكل بوصة مربعة)					
الانخفاض في درجة الحرارة التصميمية[١]، DT_D، درجة فهرنهايت					
نسبة المعامل الحراري، (α_s/α_c)					

معيار عرض الشق المسموح به، CW_{max} (بوصة)						
معيار الإجهاد المسموح به للحديد، $(\sigma_s)_{max}$ (ألف رطل للبوصة المربعة)						
النسبة المئوية (٪) للحديد المطلوب لتباعد الشقوق	**الحد الأدنى**					
	الحد الأقصى					
الحد الأدنى للنسبة المئوية (٪) للحديد المطلوب لعرض الشقوق						
الحد الأدنى للنسبة المئوية (٪) للحديد المطلوب لإجهاد الحديد						
الحد الأدنى للنسبة المئوية (٪) لحديد التسليح، P_{min}						
الحد الأقصى للنسبة المئوية (٪) لحديد التسليح، P_{max}						
ملحوظة: ١- التغير في هذه المعلمة سيؤثر على معيار عرض الشق. ٢- التغير في هذه المعلمة سيؤثر على معيار إجهاد الحديد.						

هناك مدخل إضافي تستلزمه الطريقة وهو إجهاد الشد لحمل العجلة الذي يتطور أثناء التحميل الأولي للرصف المُنفذ إما بسبب معدات الإنشاء أو مرور الشاحنات. ويمكن أن يُستخدم الشكل (٦-٨) لتقدير إجهاد حمل العجلة بناءً على السماكة التصميمية للبلاطة، ومقدار حمولة العجلة، والمعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية. كما ينبغي أيضًا تسجيل هذه القيمة في الحيز المتاح في الجدول (٦-٨).



الشكل (٦–٨) رسم بياني لتقدير قوة شد حمل العجلة (AASHTO, 1993).

٦-٨-٣-٤-١ المعايير المُقيّدة:

علاوةً على المدخلات المطلوبة لتصميم حديد التسليح الطولي، هنالك ثلاثة معايير مُقيّدة يجب أخذها في الاعتبار ألا وهي: تباعد الشقوق، وعرض الشقوق، وإجهاد الحديد. وقد وُضعت حدود مقبولة أدناه بما يضمن أن يكون أداء الرصف مرضيًا في ظل الظروف البيئية المتوقعة وظروف أحمال المركبات.

وتُشتق حدود تباعد الشقوق من الأخذ في الاعتبار تشظي أطرافها وتكسرها. ولتقليل حدوث تشظي أطراف الشقوق إلى أدنى حد ممكن، ينبغي ألا يزيد الحد الأقصى للتباعد بين الشقوق المتتالية عن ٢,٤ م (٨ أقدام) بهدف تقليل احتمالية حدوث تكسر في حوافها، علمًا بأن الحد الأدنى لتباعد الشقوق الموصى به الذي ينبغي استخدامه للتصميم هو ١ متر (٣,٥ قدم) وقد سُجلت هذه الحدود بالفعل في الجدول (٦-٨).

ويعتمد المعيار المُقيّد لعرض الشق على مراعاة تشظي أطرافه واختراق الماء عبره. علمًا بأن عرض الشق المسموح به ينبغي ألا يتجاوز ١ ملم (٠,٠٤ بوصة). وأثناء التحديد النهائي للنسبة المئوية لحديد التسليح الطولي، ينبغي تقليل العرض المتوقع للشق قدر الإمكان من خلال اختيار نسبة مئوية أعلى للحديد أو قضبان تسليح بأقطار أصغر.

المعايير المُقيّدة الموضوعة على إجهاد الحديد هي للحماية من تعرض الحديد للكسر والتشوه الدائم المفرط. للحماية من كسر الحديد، يوضع حد للإجهاد يبلغ نسبة ٧٥٪ من قوة الشد القصوى. الحد التقليدي المبين في الشكل (٦-٨) لإجهاد الحديد هو ٧٥٪ من نقطة الخضوع بحيث لا يتعرض الحديد لأي تشوه لدن.

وقد أدرجت قيم متوسط الإجهاد العامل للحديد المسموح بها للاستخدام في طريقة التصميم هذه في الجدول (٦-١٠) باعتبارها دالة في مقاس قضيب التسليح وقوة الخرسانة. وينبغي أن تكون قوة الشد غير المباشرة هي تلك المحددة في القسم الفرعي (٦-٨-١-٣). والإجهادات العاملة المُقيّدة للحديد في الجدول (٦-١٠) خاصة بالحديد من الدرجة ٦٠ (ASTM A615) الموصى به لحديد التسليح الطولي في الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح. بمجرد تحديد الإجهاد العامل المُقيّد المسموح به للحديد، ينبغي إدراجه في الحيز المتاح في الجدول (٦-٨).

الجدول (٦–١٠) الإجهاد العامل المُقيّد المسموح به للحديد (AASHTO, 1993).

مقاومة الشد غير المباشر للخرسانة عند ٢٨ يومًا	مقاس قضيب التسليح*		
	رقم ٤	رقم ٥	رقم ٦
٢,٠٧ ميجا باسكال (٣٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) أو أقل	٤٤٨ ميجا باسكال (٦٥ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٣٩٣ ميجا باسكال (٥٧ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٣٧٢ ميجا باسكال (٥٤ ألف رطل لكل بوصة مربعة)
٢,٨ ميجا باسكال (٤٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٤٦٢ ميجا باسكال (٦٧ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٤١٤ ميجا باسكال (٦٠ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٣٧٩ ميجا باسكال (٥٥ ألف رطل لكل بوصة مربعة)
٣,٤ ميجا باسكال (٥٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٤٦٢ ميجا باسكال (٦٧ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٤٢٠ ميجا باسكال (٦١ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٣٨٦ ميجا باسكال (٥٦ ألف رطل لكل بوصة مربعة)
٤,١ ميجا باسكال (٦٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٤٦٢ ميجا باسكال (٦٧ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٤٣٤ ميجا باسكال (٦٣ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٤٠٠ ميجا باسكال (٥٨ ألف رطل لكل بوصة مربعة)
٤,٨ ميجا باسكال (٧٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٤٦٢ ميجا باسكال (٦٧ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٤٤٨ ميجا باسكال (٦٥ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٤٠٧ ميجا باسكال (٥٩ ألف رطل لكل بوصة مربعة)
٥,٥ ميجا باسكال (٨٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) أو أكثر	٤٦٢ ميجا باسكال (٦٧ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٤٦٢ ميجا باسكال (٦٧ ألف رطل لكل بوصة مربعة)	٤١٤ ميجا باسكال (٦٠ ألف رطل لكل بوصة مربعة)
* بالنسبة لنسيج الأسلاك الفولاذية المحززة (DWF)، يمكن إجراء تعديلات تناسبية باستخدام نسبة قطر السلك الفولاذي إلى قطر قضيب التسليح.			

٦-٨-٣-٤-٢ طريقة التصميم:

يمكن استخدام الطريقة التالية لتحديد مقدار التسليح الطولي المطلوب.

١- قم بإيجاد الكمية المطلوبة من حديد التسليح لاستيفاء كل معيار مُقيد يُحدد باستخدام الرسوم البيانية التصميمة في الأشكال من (٦-٩) إلى (٦-١١). سجل النسب المئوية للحديد المتوصل إليها في الفراغات الموجودة في ورقة العمل بالجدول (٦-٨).

٢- إذا كان الحد الأقصى للنسبة المئوية لحديد التسليح (P_{max}) أكبر من الحد الأدنى للنسبة المئوية لحديد التسليح (P_{min}) أو يساويه، انتقل إلى الخطوة رقم ٣. إذا كان (P_{max}) أقل من (P_{min}) فعندئذٍ:

أ- راجع مدخلات التصميم وتحديد أي من المدخلات يجب تنقيحه.

ب- وضح مدخلات التصميم المنقحة في ورقة العمل المبينة في الجدول (٦-٩). قم بأي تغيير مقابل في المعايير المُقيّدة بالكيفية التي أثر بها تغيير معلمة التصميم وسجل ذلك في الجدول (٦-٩). تحقق ما إذا كانت المدخلات المنقحة تؤثر على تصميم سمك كل من طبقة ما تحت الأساس والبلاطة أم لا. ويمكن أن يكون من الضروري إعادة تقييم تصميم سمك البلاطة وطبقة ما تحت الأساس.

ج- أعد استخدام الرسوم البيانية التصميمية واكتب النسب المئوية للحديد المتوصل إليها في الجدول (٦-٩).

د- إذا كان (P_{max}) أكبر من (P_{min}) أو يساويه، انتقل إلى الخطوة رقم ٣. أما إذا كان (P_{max}) أقل من (P_{min})، كرر هذه الخطوة في الفراغ الموجود في الجدول (٦-٩) لإجراء محاولات إضافية.

٣- تحديد عدد قضبان أو أسلاك حديد التسليح اللازمة:

$$N_{min} = 0.01273 \times P_{min} \times W_s \times D/\varphi/2$$ **المعادلة (٦-٧)**

$$N_{max} = 0.01273 \times P_{max} \times W_s \times D/\varphi/2$$ **المعادلة (٦-٨)**

حيث:

N_{min}= الحد الأدنى لعدد قضبان أو أسلاك حديد التسليح اللازمة.

N_{max}= الحد الأقصى لعدد قضبان أو حديد التسليح اللازمة.

P_{min}= الحد الأدنى للنسبة المئوية لحديد التسليح اللازمة.

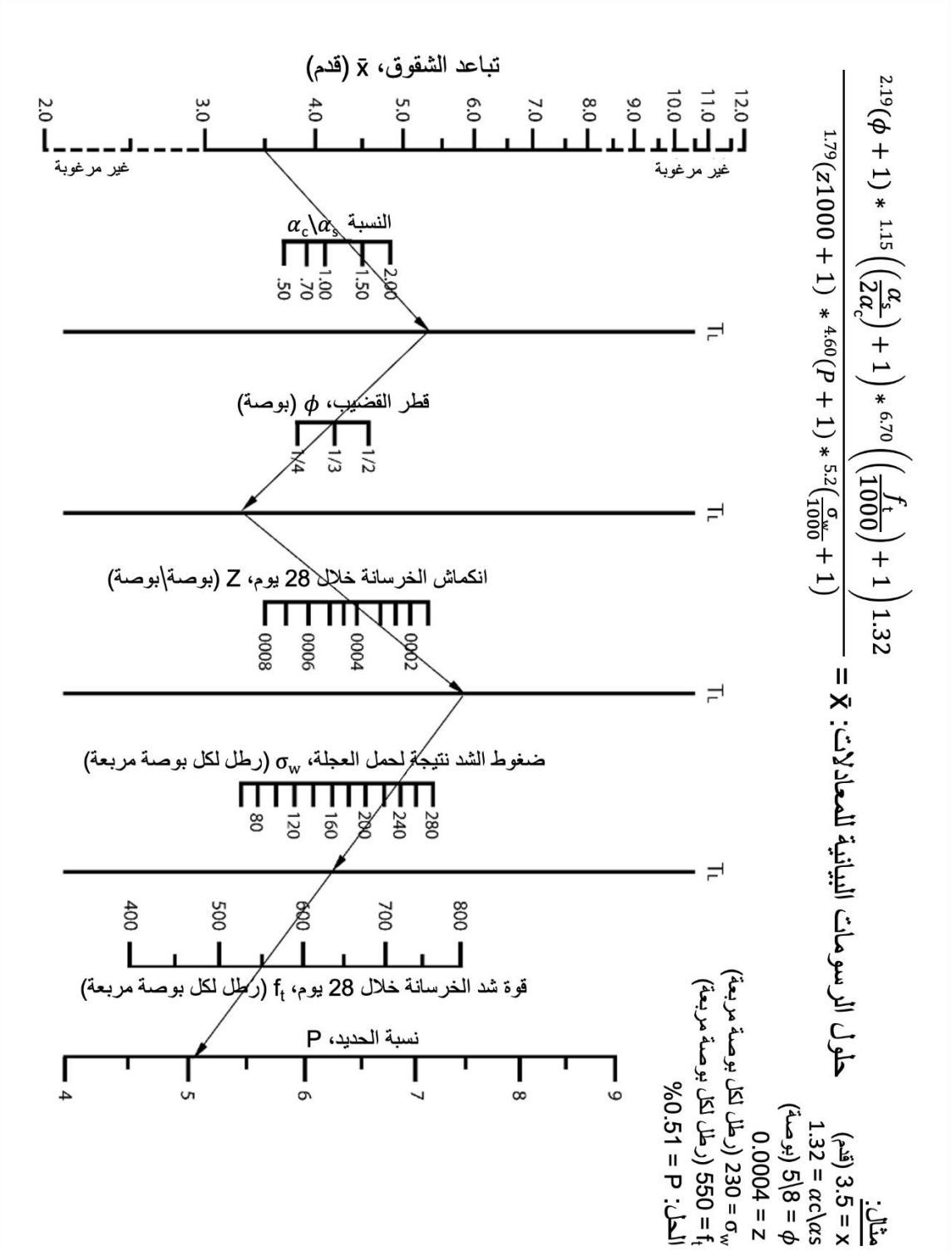
P_{max}= الحد الأقصى للنسبة المئوية لحديد التسليح اللازمة.

W_s = إجمالي عرض مقطع الرصف (بوصة).

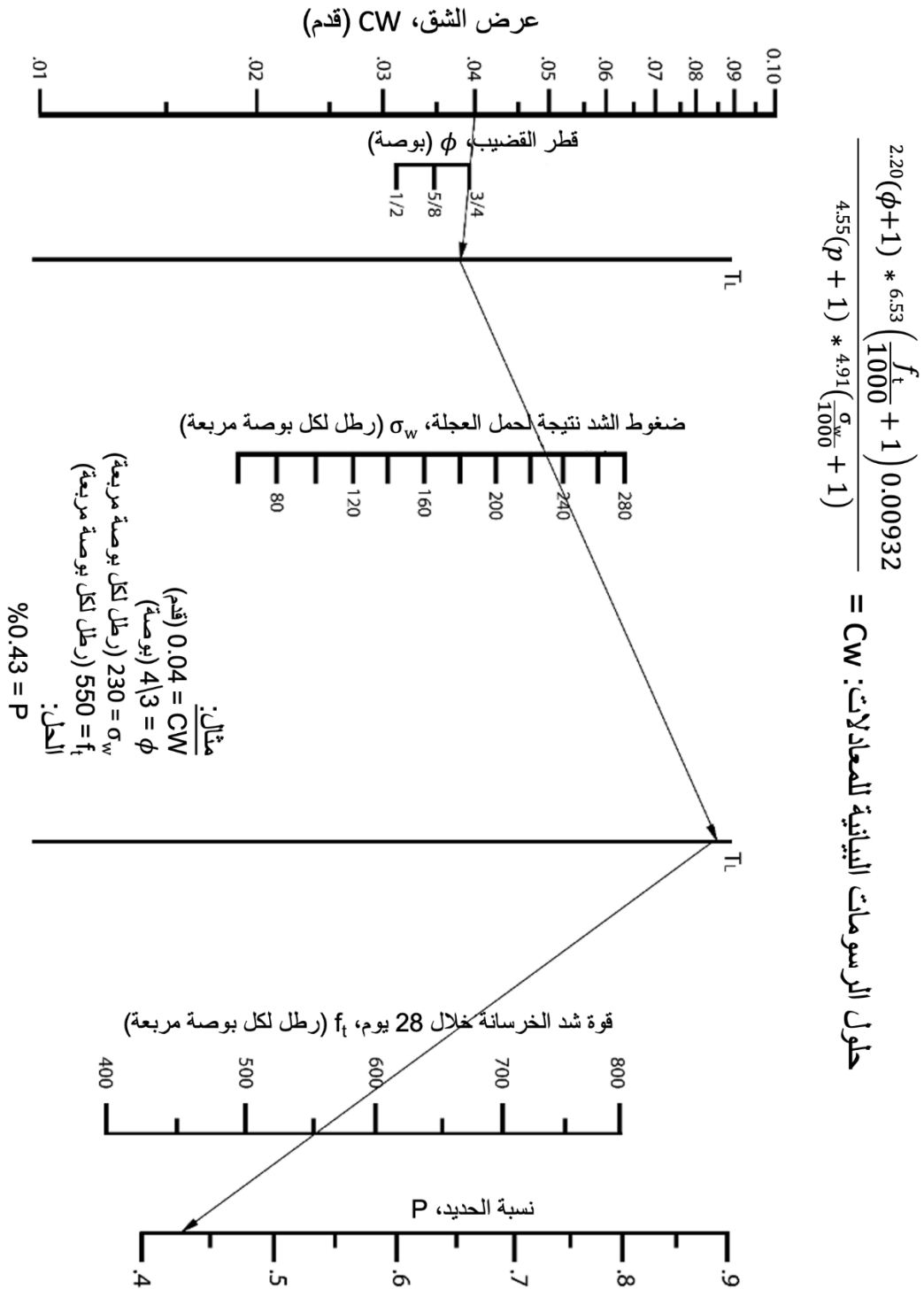
D= سمك الطبقة الخرسانية (بوصة).

φ= قطر قضيب أو سلك حديد التسليح (بوصة) الذي يمكن أن يرتفع في حال توقع حدوث فاقد في القطاع العرضي لتآكله بسبب الصدأ.

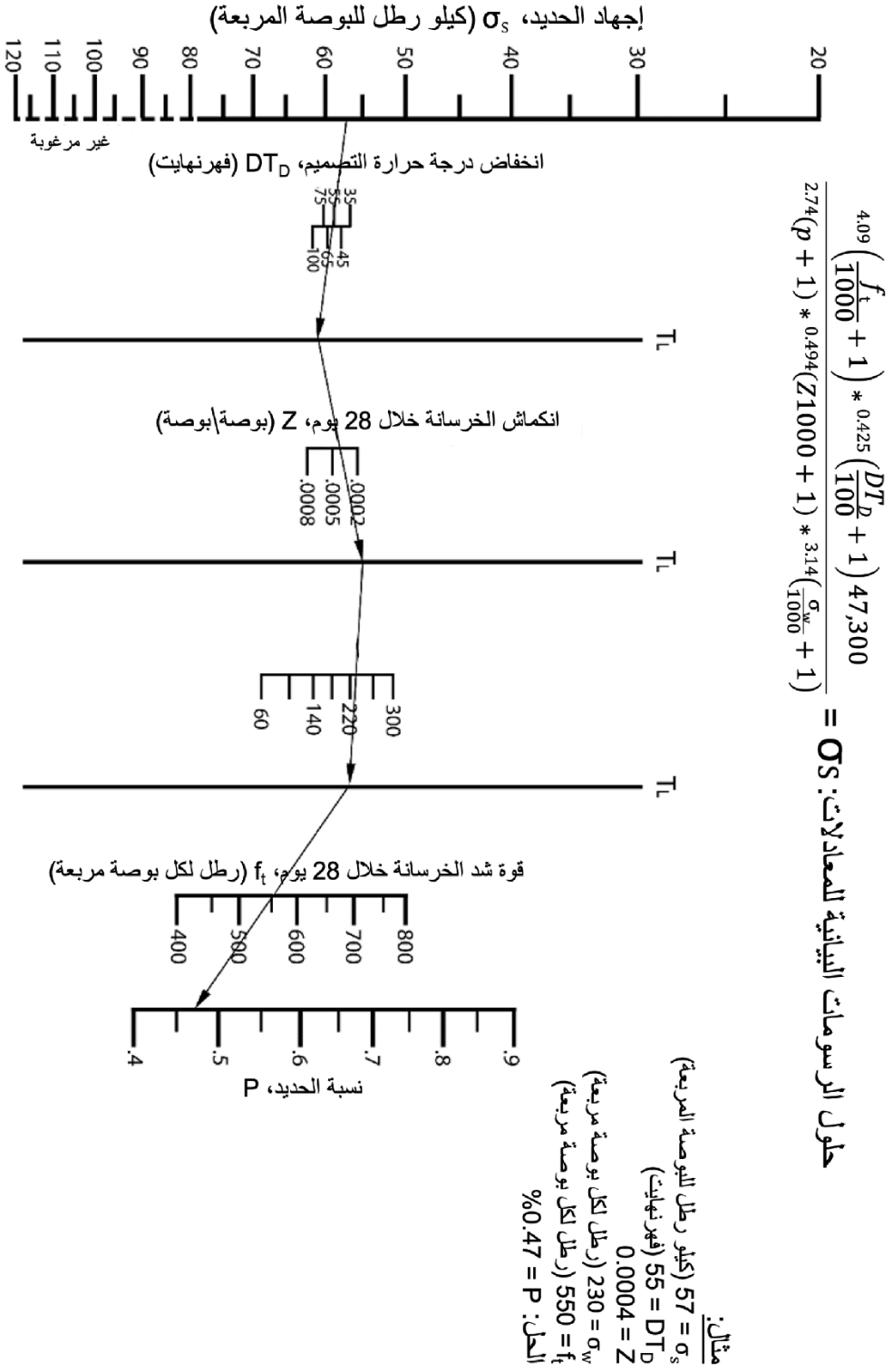
٤- تحديد التصميم النهائي للحديد باختيار العدد الإجمالي لقضبان أو أسلاك حديد التسليح في المقطع التصميمي النهائي، (N_{Design})، بحيث يكون (N_{Design}) عددًا صحيحًا كاملًا بين (N_{min}) و (N_{max}). يمكن التحقق من ملاءمة بدائل التصميم النهائية هذه بتحويل العدد الصحيح من القضبان أو الأسلاك الحديدية إلى نسبة مئوية من الحديد والعمل باتجاه معاكس باستخدام الرسوم البيانية التصميمية لتقدير كل من تباعد الشقوق وعرضها وإجهاد الحديد.



الشكل (٦–٩) النسبة المئوية للتسليح الطولي لاستيفاء معايير تباعد الشقوق (AASHTO, 1993).



الشكل (٦–١٠) الحد الأدنى للنسبة المئوية للتسليح الطولي لاستيفاء معيار عرض الشق (AASHTO, 1993).



الشكل (٦–١١) الحد الأدنى للنسبة المئوية للتسليح الطولي لاستيفاء معايير إجهاد الحديد (AASHTO, 1993).

٦-٨-٣-٥ حديد التسليح العرضي:

يُركب حديد التسليح العرضي إما في الرصفيات ذوات الوصلات أو المستمرة في الظروف التي يؤدي فيها تغير حجم التربة (بسبب التغيرات إما في درجة الحرارة أو الرطوبة) إلى حدوث شقوق طولية. سيحول حديد التسليح دون الانفتاح المفرط للشقوق الطولية، مما يمكن من الحفاظ على الحد الأقصى لتحويل الأحمال وتقليل دخول المياه إلى أدنى حد.

في حالة الرغبة في استخدام قضبان التسليح العرضي و/أو قضبان الربط، عندها تنطبق المعلومات المجمعة في القسم الفرعي (٦-٨-١-٣) (الرصفيات الخرسانية المسلحة ذوات الفواصل). في هذه الحالة، ينبغي أن يُحسب طول البلاطة على أنه المسافة بين الحواف الطولية. وإذا وُضعت قضبان الربط داخل الفاصل الطولي، فلا يُعد الفاصل حافة حرة.

فيما يخص التسليح العرضي الطبيعي، يمكن استخدام الشكل (٦-٧) لتحديد النسبة المئوية لحديد التسليح العرضي. ويمكن تحويل النسبة المئوية لحديد التسليح العرضي إلى تباعد بين قضبان التسليح على النحو التالي:

المعادلة (٦-٩)

$$Y = \frac{A_S}{P_t \times D} \times 100$$

حيث:

Y= تباعد حديد التسليح العرضي (بوصة).

A_s = مساحة القطاع العرضي لحديد التسليح العرضي (بوصة مربعة).

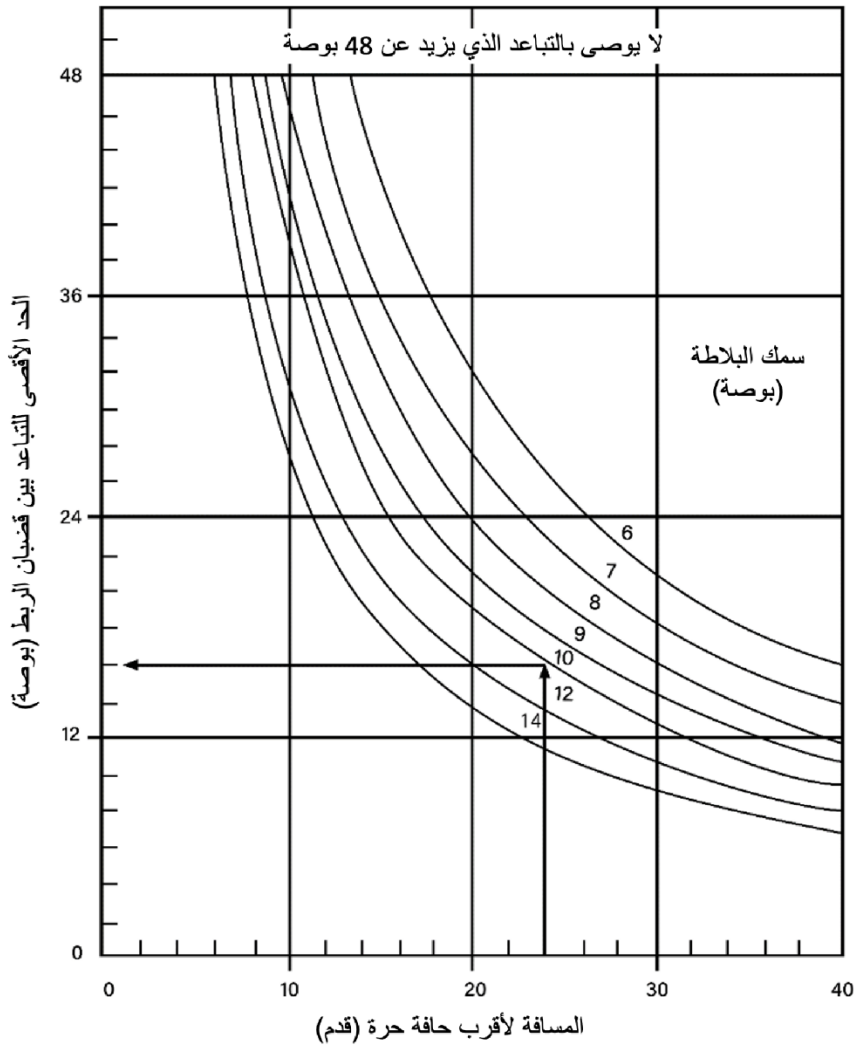
P_t= النسبة المئوية لحديد التسليح العرضي.

D = سُمك البلاطة (بوصة).

يمكن استخدام الشكل (٦-١٢) والشكل (٦-١٣) لتحديد تباعد قضبان الربط للقضبان المُحززة التي بقطر (١٢,٧) ملم و (١٥,٩) ملم (٠,٥ بوصة و ٨/٥ بوصة)، على التوالي. يُدخل المصمم الرقم في السطر الأفقي بحيث تكون المسافة إلى أقرب محور حافة حرة ويكمل عموديًا حتى يصل إلى سمك الرصف المحدد وفقًا للقسم الفرعي (٦-٨-٢-٢). بداية من عمود سمك الرصف، تحرك أفقيًا واقرأ تباعد قضبان الربط من المقياس الرأسي. وتعتمد هذه الرسوم البيانية (nomographs) على كل من أن الحديد هو من الدرجة ٤٠ وأن عامل احتكاك القاعدة الترابية قيمته (١,٥).

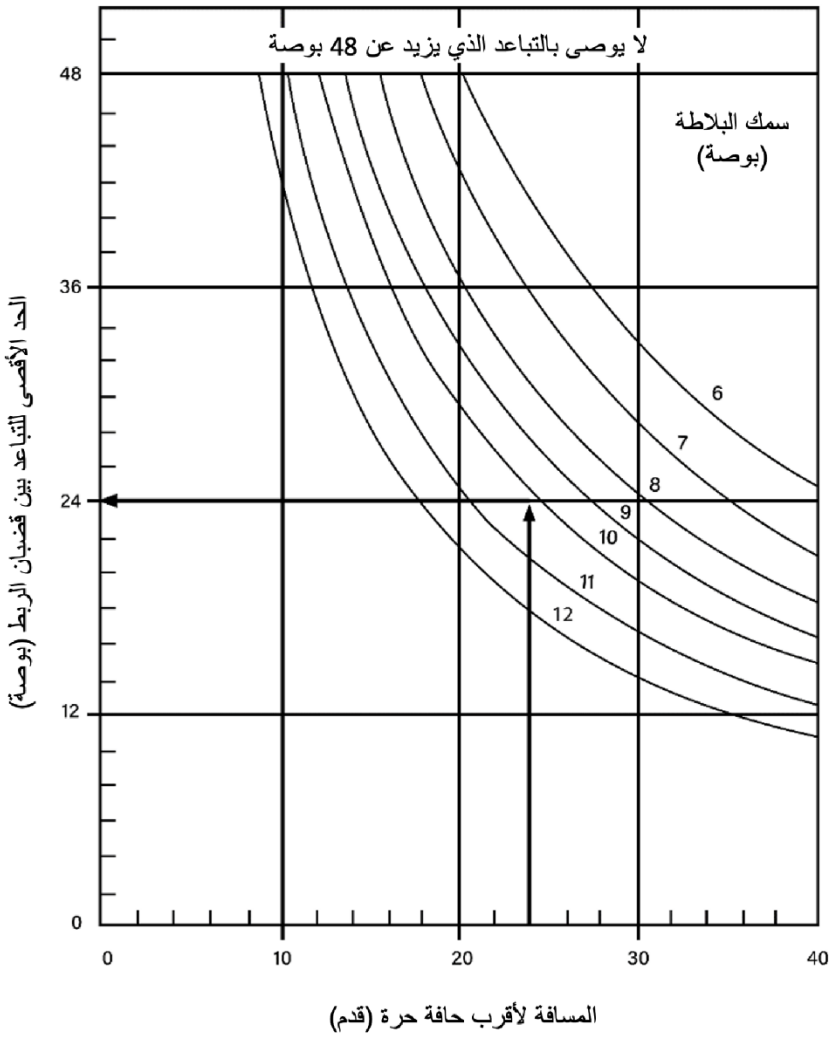
نظرًا لأن إجهاد الحديد يتناقص من الحد الأقصى بالقرب من مركز البلاطة (بين الحواف الحرة) ويصل إلى صفر عند الحواف الحرة، فإن الحد الأدنى المطلوب من تباعد قضبان الربط يتزايد. لذا، ومن أجل تصميم فعال لقضبان الربط ينبغي على المصمم أولاً تحديد المخطط العام لفواصل الإنشاء الطولية.

أخيرًا، إذا كان من المقرر السماح بانحناء قضبان الربط أثناء الإنشاء، ينبغي، منعًا لوهن الحديد، تجنب استخدام الحديد الهش (محتوى عالي الكربون) واختيار مستوى إجهاد عامل مناسب للحديد.



مثال: المسافة من حافة حره = 24 (قدم)
D = 10 (بوصة)
الإجابة: المسافة = 16 (بوصة)

الشكل (٦–١٢) الحد الأقصى الموصى به لتباعد قضبان الربط لرصفيات خرسانة الأسمنت البورتلاندي بافتراض أن قطر قضيب الربط ١٢,٧ ملم (٠,٥ بوصة) وأن الحديد من الدرجة ٤٠، وأن معامل احتكاك القاعدة الترابية هو (١,٥) (AASHTO, 1993).



مثال: المسافة من حافة حره = 24 قدم
D = 10 (بوصة)
الإجابة: المسافة = 24 (بوصة)

الشكل (٦–١٣) الحد الأقصى الموصى به لتباعد قضبان الربط لرصفيات خرسانة الأسمنت البورتلاندي بافتراض أن قطر قضيب الربط ١٥,٩ ملم (٨/٥ بوصة) وأن الحديد من الدرجة ٤٠، وأن معامل احتكاك القاعدة الترابية هو (١,٥) (AASHTO, 1993).

٦-٨-٤ رصف الخرسانة مسبقة الإجهاد:

خُرر هذا الجزء الفرعي لإعطاء المستخدم بعض المبادئ التوجيهية العامة حول تصميم الرصف الخرساني المسبق الإجهاد (PCP). يُعرف الرصف الخرساني المسبق الإجهاد بأنه الرصف الذي يتعرض أساسًا لإجهاد ضغط دائم وأفقي فعليًا قبل مرور أي من أحمال العجلات فوقه. وأشارت الخبرة السابقة إلى أن إمكانات الرصف الخرساني المسبق الإجهاد تتمثل في جانبين مهمين على الأقل، هما:

١- استخدام أكثر كفاءة لمواد الإنشاء.
٢- تطلب فواصل أقل واحتمال أقل لحدوث تشقق مما ينتج عنه تطلب صيانة أقل وعمر أطول للرصف.

في التصميم التقليدي للرصف الخرساني، تُحصر الإجهادات بسبب أحمال العجلات ضمن المدى المرن للخرسانة. لذا، يُحدد سمك الرصف بحيث لا يتجاوز إجهاد شد الألياف الشديد بسبب الأحمال المُطبّقة قوة الانحناء أو معامل تمزق الخرسانة. في منهج التصميم التقليدي هذا، لا تُستخدم الخرسانة الموجودة بين الألياف العلوية والسفلية القصوى للبلاطة استخدامًا كليًا لمقاومة الإجهادات بسبب الأحمال المُسلّطة، مما يؤدي إلى استخدام غير كفء لمواد الإنشاء.

وبفضل استخدام الرصف الخرساني المسبق الإجهاد، يزيد إجهاد الضغط المستحث قوة الانحناء الفعالة للخرسانة، كما أنه الآن أصبح غير مُقيّد في قدرته على تحمل الأحمال بمعامل تمزق الخرسانة. لذا فإن سمك الرصف المطلوب لأي أحمال معطاة يقل كثيرًا عن السمك المطلوب للرصف الخرساني التقليدي.

في أغلب الرصفيات الخرسانية المسبقة الإجهاد المُنشأة سابقًا، أُستخدمت إحدى توجهات الإجهاد المسبق الآتية:

١- يُطبّق الإجهاد المسبق فقط بالاتجاه الموازي للمحور الطولي للرصف. ويمكن أن يكون الرصف مسلحًا أو غير مسلح في الاتجاه العرضي.
٢- يُطبّق الإجهاد المسبق في كلا الاتجاهين الموازي والعمودي على المحور الطولي للرصف.
٣- يُطبّق الإجهاد المسبق قطريًا بزاوية على المحور الطولي للرصف. ويمكن الوصول إلى كلا مستويات الإجهاد المسبق المرغوب فيها الموازية للمحور الطولي للرصف والعمودية عليه بمجرد تعديل الزاوية التي يُطبّق فيها الإجهاد المسبق.

يمكن أن يؤثر توجيه الإجهاد المسبق المعين الذي يريد المصمم استخدامه في مشروع ما تأثيرًا كبيرًا على طريقة الإجهاد المسبق المستخدمة.

تؤثر العوامل الآتية على أداء المنهج التصميمي للرصف الخرساني المسبق الإجهاد تأثيرًا مباشرًا: دعم طبقة ما تحت الأساس، وطول البلاطة، ومقدار الإجهاد المسبق، وتباعد الكابلات، وكلل الخرسانة.

٦-٨-٤-١ طبقة ما تحت الأساس

رغم أنه قد أُثبت أن الأداء المقبول للرصف الخرساني المسبق الإجهاد يمكن الحصول عليه بدعم منخفض القوة إذا أُتخذت ترتيبات لمنع الضخ، فإن جميع طبقات ما تحت الأساس السابقة للرصف الخرساني المسبق الإجهاد كان بها قوة كبيرة إلى حد معقول (عادة ما يكون عامل رد فعل القاعدة الترابية (١,٤) ميجا باسكال (٢٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)، أو أكبر من ذلك). والسبب الرئيس وراء ذلك هو عدم رغبة المصممين في المخاطرة بانهيار الرصف إذا كان مُنفّذًا على طبقة ما تحت أساس منخفضة القوة. ورغم استخدام طبقات أساس من الخرسانية الأسفلتية والخرسانة الأسمنتية في التربة لزيادة قوة الدعم، فإن الطريقة الأكثر شيوعًا كانت استخدام طبقة من المواد الحبيبية المدموكة. كان سمك الطبقة بشكل عام في حدود (١٥٠ – ٣٠٠) ملم (٦ - ١٢ بوصة)، ولكن أُستخدم سمك قليل يبلغ ١٠٠ ملم (٤ بوصة) وآخر كبير يصل إلى ٤٥٧ ملم (١٨ بوصة).

٦-٨-٤-٢ طول البلاطة

يشير طول البلاطة إلى المسافة بين الفواصل العرضية النشطة وليس للمسافة بين فواصل الإنشاء المتوسطة غير النشطة. ويوجد عاملان رئيسان يجب مراعاتهما عند اختيار الطول الأمثل لبلاطة الرصف الخرساني المسبق الإجهاد، هما:

١- قوة الإجهاد المسبق اللازمة للتغلب على مقاومة الاحتكاك بين القاعدة الترابية والبلاطة ولتوفير الحد الأدنى لإجهاد الضغط عند منتصف طول البلاطة بحيث يتناسب مع طول البلاطة. والتكلفة ذات الصلة بتوفير قوة الإجهاد المسبق تتناسب بدورها مع مقدار القوة اللازمة.
٢- يتناسب عدد الفواصل العرضية وتكلفتها الإجمالية تناسبًا عكسيًا مع طول البلاطة. ونظرًا إلى أن الفواصل العرضية ربما تُمثل أكبر عنصر من عناصر صيانة الرصف، لذا ينبغي ألا تستند التكلفة الإجمالية للفواصل العرضية على التكلفة الأولية وحسب، بل ينبغي أن تتضمن -أيضًا- تقديرًا لتكلفة الصيانة على مدار عمر المنشأة. وعمومًا، يجب البحث عن حل وسط بين هذين العاملين. واستنادًا إلى مشاريع الرصف الخرساني المسبق الإجهاد المنشأة حتى الآن، يبدو أن طول الرصف الذي في حدود ١٢٢ م (٤٠٠ قدم) يحقق توازنًا معقولًا بين هذين القيدين.

٦-٨-٤-٣ مقدار الإجهاد المسبق

يجب أن يكون كل من مقدار الإجهاد المسبق الطولي والعرضي كبيرًا بما يكفي لتوفير إجهاد ضغط كافٍ عند منتصف طول بلاطة الرصف ومنتصف العرض المحتمل لها أثناء فترة الانكماش لتحمل الإجهادات التي تحدث عند مرور الأحمال. يجب أخذ العديد من العوامل في الحسبان ضمانًا للحصول على مستوى الإجهاد المسبق المطلوب، بما في ذلك مقدار مقاومة الاحتكاك بين البلاطة وطبقة ما تحت الأساس، وسمك البلاطة، وطولها، والحد الأقصى للفرق في درجات الحرارة المتوقعة أثناء عمر الرصف.

في بعض مشاريع الرصف الخرساني المسبق الإجهاد السابقة، أُستخدمت مستويات مرتفعة نسبيًا من الإجهاد المسبق ضمانًا لكفايته. ومع ذلك، فقد أثبتت الاختبارات المعملية الصغيرة الحجم والاختبارات الميدانية الكبيرة الحجم أن الفوائد الإنشائية لا تزيد بما يتناسب مع الزيادات في مستويات الإجهاد المسبق. لذا، استخدمت المشاريع الحديثة مستويات الإجهاد المسبق التي تتراوح بين (٠,٦٩ - ٢,٠٧) ميجا باسكال (١٠٠ - ٣٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) طوليًا وبين (٠ - ١,٣٨) ميجا باسكال (٠ - ٢٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) عرضيًا.

٦-٨-٤-٤ تباعد الكابلات

إن العوامل الرئيسة التي تحكم تباعد الكابلات هي كل من مقاسات الكابلات، ومقدار الإجهاد المسبق التصميمي، وإجهاد تحمل الخرسانة المسموح به عند مواضع تثبيت الكابلات، وإجهاد تثبيت الكابلات المسموح به. على الرغم من أن تباعد قضبان الكابلات والكابلات المكونة من مجموعة أسلاك فولاذية مجدولة قد تفاوت من حد أدنى بلغ ضعف سمك البلاطة إلى حد أقصى بلغ ثمانية أضعاف سمك البلاطة، ولكن نمطيًا، أُستخدمت مسافات تباعد بلغت من ضعف إلى أربع أضعاف للكابلات الطولية، ومن ثلاثة أضعاف إلى ستة أضعاف سمك البلاطة للكابلات العرضية. ويُضبط الإجهاد المسموح به في الكابل عند نسبة ٠,٨ من إجهاد الخضوع، وعمومًا، تُستخدم أسلاك فولاذية مجدولة بمقاس ١٥,٢ ملم (٨/٥ بوصة).

٦-٨-٤-٥ الكلل

نظرًا لضآلة البيانات المتوفرة حول العلاقة بين عدد مرات تكرار الأحمال ومتطلبات التصميم، يُوصى بأن يستخدم المصمم عوامل مرات تكرار تحميل متحفظة. ويُؤيد ذلك المشاهدة بأنه لا يوجد سوى تحذير مسبق ضئيل يصاحب انهيار الأحمال للرصف الخرساني المسبق الإجهاد، أي أن الرصف الخرساني المسبق الإجهاد يمكن أن يتطلب عدد مرات تكرار أحمال قليلة فقط للانتقال من إظهار علامات أولية قليلة من العيوب إلى الانهيار الكلي.

٦-٨-٤-٦ التصميم الإنشائي للرصف الخرساني المسبق الإجهاد

٦-٨-٤-٦-١ بنود عامة

تصميم الرصف الخرساني المسبق الإجهاد هو في الأساس تطبيق للخبرة والتقدير الهندسي. لذا، ينبغي أن يعرف المصمم المبدأ الأساسي الذي مفاده أنه كلما زاد مستوى الإجهاد المسبق، قل سُمك الرصف. ورغم ذلك، لا يمكن التعرف على الإمكانات الكاملة، إذ يجب الحفاظ على سمك كافٍ منعًا للانحراف المفرط والمشاكل الناجمة عن ذلك. وفيما يلي الخطوات الأساسية لتصميم الرصف الخرساني المسبق الإجهاد:

١- اختر سمك الرصف من خلال المعايير الواردة في القسم الفرعي التالي، والمقدار العملي للإجهادات المسبقة المزمع تحقيقها في وسط البلاطة.
٢- باستخدام تباعد الفواصل المُختار واحتكاك طبقة ما تحت الأساس، احسب الفاقد الناجم عن تقييد القاعدة الترابية كما هو مبين في القسم الفرعي التالي.
٣- قدّر فاقد الإجهاد المسبق كما هو مبين في القسم الفرعي التالي.
٤- أضف المقدار المرغوب من الإجهاد المسبق من الخطوة ١ إلى الفاقد من الخطوتين ٢ و ٣ للحصول على مستوى الإجهاد المسبق الواجب تطبيقه عند طرف البلاطة.
٥- يمكن التوصل إلى تباعد الكابلات من المعادلة الآتية:

المعادلة (٦-١٠)

$$Y_t = \frac{f_t \times A_f}{\sigma_p \times D}$$

حيث:

Y_t = الإجهاد العامل المسموح به في الكابل (رطل لكل بوصة مربعة).

A_f= مساحة القطاع العرضي للكابل (بوصة مربعة).

D = سُمك الرصف المُختار (بوصة).

σ_p = مستوى الإجهاد المسبق عند الطرف المتحصل عليه من الخطوة ٤.

٦-٨-٤-٦-٢ سماكة الرصف

ينبغي مراعاة العديد من عوامل كل من قوة القاعدة الترابية للطريق وقوة الخرسانة ومقدار الإجهاد المسبق وأحمال المرور المتوقعة عند تحديد السمك المطلوب للرصف الخرساني المسبق الإجهاد. سابقًا، كان سُمك الرصف الخرساني المسبق الإجهاد للطرق -عمومًا- يُحدد على أساس توفير الحد الأدنى المسموح به لطبقة التكسية الخرسانية فوق كابلات الإجهاد المسبق أكثر من الاعتماد على أساس اعتبارات القدرة على تحمل الأحمال. وأفضى هذا الإجراء إلى أن أصبح سمك الرصف الخرساني المسبق الإجهاد من (٤٠٪) إلى (٥٠٪) من سمك الرصف الخرساني التقليدي المُعادل. في مختلف المشروعات كان سمك رصف الطريق يبلغ -عادة- من (١٠٠) إلى (١٥٢) ملم (٤ - ٦ بوصة).

٦-٨-٤-٦-٣ تقييد القاعدة الترابية

هي حركة الرصف الخرساني المسبق الإجهاد التفاضلية بالنسبة لطبقة ما تحت الأساس التي تحدث بسبب كل من الانكماش المرن للرصف في أثناء تعرضه للإجهاد، وتغيرات الحرارة/الرطوبة في الرصف، وزحف الرصف. ويقاوم هذه الحركة الاحتكاك الذي بين الرصف والقاعدة الترابية، مما يؤدي إلى إجهادات تقييد في الرصف. وتُضاف إجهادات التقييد هذه الإجهاد المسبق التصميمي في أثناء فترات تزايد طول الرصف، وتُطرح من الإجهاد المسبق التصميمي في أثناء انخفاض طول الرصف.

مقدار إجهادات التقييد هو دالة في كل من معامل احتكاك القاعدة الترابية وأبعاد البلاطة، ويبلغ حده الأقصى عند منتصف طول البلاطة ومنتصف عرضها. وتبين المعادلة الآتية قيم الحد الأقصى لهذا الإجهاد، الناتج من خرسانة يصل وزن وحدتها إلى (٢,٣٠٦,٨٨) كجم/ متر مكعب (١٤٤ رطل لكل قدم مربع):

المعادلة (٦-١١)

$$f_{SR} = \mu \times L/2$$

حيث:

f_{SR}= الحد الأقصى لإجهاد تقييد القاعدة الترابية (رطل لكل بوصة مربعة).

μ = معامل احتكاك القاعدة الترابية.

L = طول البلاطة (قدم).

عادة ما تُنشأ الرصفيات الخرسانية المسبقة الإجهاد فوق طبقة من النوع المُقلّل للاحتكاك، مثل: ورق الصقل (الصنفرة) وأوراق الإنشاء العازلة أو صفائح الرمل والبولي إيثيلين. وعندما تُوضع طبقة مقللة للاحتكاك، عادة ما تتراوح معاملات احتكاك القاعدة الترابية بين (٠,٤ - ١,٠).

٦-٨-٤-٦-٤ فاقد الإجهاد المسبق

تتضمن العوامل التي تسهم في فقدان الإجهاد المسبق ما يلي: (١) التقلص المرن للخرسانة، (٢) زحف الخرسانة، (٣) انكماش الخرسانة، (٤) ارتخاء كابلات الإجهاد، (٥) انزلاق كابلات الإجهاد في أجهزة التثبيت، (٦) الاحتكاك بين كابلات الإجهاد والقنوات الحاوية لها، (٧) الانكماش الحراري-المائي للرصف.

ونظرًا للعوامل أعلاه، ينبغي توقع وجود فاقد في الإجهاد المسبق بنسبة من (١٥٪) حتى (٢٠٪) من قوة الإجهاد المسبق المُطبَّقة لإنشاء رصف خرساني مسبق الإجهاد بعناية، سواء المشدود قبليًا (pre-tensioned) أو بعديًا (post-tensioned). بالنسبة للرصف الخرساني المسبق الإجهاد والمشدود لاحقًا، يمكن أن يُفقد كل الإجهاد المسبق ما لم تُتخذ الاحتياطات المناسبة. ويجب أخذ هذا الفاقد في الحسبان عند تصميم الرصف الخرساني المسبق الإجهاد وذلك لضمان الحفاظ على مستوى الإجهاد المسبق اللازم على مدار عمر الرصف.

ويُعبر -عمومًا- عن حالات الفاقد في الإجهاد المسبق، سواء المشدودة قبلاً او بعدًا، بأنها فاقد إجهاد الكابلات. لذا، يجب زيادة الإجهاد المسبق المُطبق على الرصف باستخدام الكابلات لمقاومة حالات فقدان الإجهاد الناجمة عن التعديلات الطبيعية في المواد أثناء الإنشاء وبعده.

٧- تصميم الرصفيات المركبة:

٧-١ نموذج الرصف:

نموذج الرصفيات المركبة موضح في الشكل (٢-٧).

٧-٢ معايير التصميم:

معايير تصميم الرصفيات المركبة هي وفق تلك المذكورة في الجزء (٦-٢).

٧-٣ العمر التصميمي:

يُشير العمر التصميمي إلى المدة الزمنية التي يجب إجراء التحليل لها، أي طول الفترة الزمنية الذي يجب أن تغطيه أي استراتيجية تصميم. وعادةً ما تُصمم الرصفيات المركبة وتُحلل لفترة أداء تبلغ ٣٠ عامًا.

٧-٤ الأحمال المرورية:

راجع الجزء (٦-٤).

٧-٥ العوامل البيئية:

راجع الجزء (٦-٦).

٧-٦ خواص المواد:

خواص المواد مشروحة في الجزء (٦-٧).

٧-٧ التصميم الإنشائي:

في معظم الحالات، الرصفيات المركبة هي نتيجة لإعادة تأهيل الرصفيات الصلبة بإضافة طبقة تكسية أسفلتية. ولذلك، تُتبع المنهجية المشروحة في الجزء (٩-٧)، وفي حال إنشاء رصف مركب جديد، فعندئذٍ ستُتبع الطريقة التالية باستخدام دليل (AASHTO) لعام ١٩٩٣.

- صمم رصف صلب تقليدي واحسب السماكة بهدف تلبية الطلب المروري المستقبلي (D_f) باتباع الطريقة المشروحة في القسم الفرعي (٩-٧-٣-١).
- افترض أن السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}) قد خُفضت لكي تستبدل بطبقة تكسية من الخرسانة الأسمنتية.
- تعطي المعادلة (٩-١٢) قيمة العامل (A)، وهو دالة في نقص سماكة خرسانة الأسمنت البورتلاندي.
- يمكن حساب السماكة المطلوبة لطبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية (D_{ol}) من خلال المعادلة (٩-١١).

فعلى سبيل المثال، افترض أن السمك الذي يلبي الطلب المروري المستقبلي (D_f) يساوي ٢٠٠ مم (٧,٨٨ بوصة) وأن التخفيض المرغوب في سماكة البلاطة هو ٨٠ مم (٣,١٥ بوصة). فإن السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}) تساوي (٢٠٠ - ٨٠ = ١٢٠) ملم (٣,١٥ بوصة). وبتطبيق المعادلة (٩-١٢)، فإن العامل (A) يساوي ١,٨. وأيضًا، بتطبيق المعادلة (٩-١١) فإن سماكة طبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية (D_{ol}) المطلوبة تساوي ١٤٧ ملم (٥,٨ بوصة). ولذلك، سيتكون الرصف المركب من بلاطة خرسانية بسُمك ١٢٠ مم وطبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية بسُمك ١٤٧ مم.

٨- تصميم رصفيات الفئات الخاصة:

٨-١ الطرق غير المُعبّدة:

٨-١-١ متطلبات التصميم:

يُشير مصطلح الطرق غير المُعبّدة إلى الطرق ذات أسطح الركام (الحصى). ويبلغ الحد الأقصى لمستوى المرور ١٠٠,٠٠٠ من عدد مرات تطبيق مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل)، بينما يبلغ المستوى الأدنى العملي ١٠,٠٠٠. ويكون الأساس المعتمد لمعالجة تأثيرات تغيرات الرطوبة الموسمية على معامل مرونة القاعدة الترابية (M_R) هو نفس الأساس المعتمد لتصميم الطرق ذات الأسطح الركامية مثلما هو الحال في تصميم الرصف المرن أو الصلب. غير أن التصميم المستند إلى الرسم البياني التصميمي يستلزم حلاً باستخدام الرسم البياني. وفيما يلي متطلبات التصميم الأساسية للطريق ذي السطح الركامي:

- المرور المستقبلي المتوقع، w_{18}، للفترة التصميمية (الجزء الفرعي ٥-٢-٤).
- اطوال الفصول (القسم الفرعي ٥-٢-٦-١).
- معامل المرونة الموسمي للقاعدة الترابية (القسم الفرعي ٥-٢-٦-١)
- معامل المرونة لطبقة الأساس الحبيبية، E_{BS} (القسم الفرعي ٥-٢-٦-٣)
- معامل المرونة لطبقة ما تحت الأساس الحبيبية، E_{SB} (القسم الفرعي ٥-٢-٦-٢).
- الفاقد في قابلية الخدمة (ΔPSI) (الجزء الفرعي ٥-٢-٢)
- التخدد المسموح به في الطبقة السطحية، RD.
- الفاقد الركامي في الطبقة السطحية، GL.

٨-١-٢ التخدد المسموح به:

إن فشل عمق التخدد المتنبأ به للطريق ذي السطح الركامي لا يشير إلى وجود تخدد سطحي بسيط، وإنما يشير إلى وجود تخدد خطير مرتبط بتشوه الهيكل الإنشائي للرصف ودعامة القاعدة الترابية للطريق. ويعتمد عمق التخدد المسموح به للطريق ذي السطح الركامي على متوسط المرور اليومي. نمطيًا، تتراوح أعماق التخدد المسموح بها من ٢٥ إلى ٥٠ مم.

٨-١-٣ فاقد الركام:

حينما يحدث أي فقد في الركام، يصبح الهيكل الإنشائي للرصف أرق وتنخفض قدرته على تحمل الأحمال. لكي يتسنى معالجة الفقد في الركام في الطريقة، فإن من الضروري تقدير كل من السماكة الكلية للركام المتوقع فقده خلال الفترة التصميمية والحد الأدنى لسماكة الركام المطلوبة للحفاظ على طبقة سطحية عاملة باستمرار لبُنية الرصف. ويمكن استخدام المعادلات التالية للتنبؤ بمقدار فاقد الركام.

المعادلة (٨-١)

$$GL = 0.12 + 0.1223 \times LT$$

حيث:

GL = إجمالي الفاقد من الركام (بوصة).

LT = عدد الشاحنات المحملة (بالألف).

وقد طورت المعادلة (٨-١) للتطبيق على المقاطع التي تتخطى فيها نسبة مرور الشاحنات ٥٠٪.

المعادلة (٨-٢)

$$GL = \frac{B/25.4}{0.0045 \times LADT + \frac{3380.6}{R} + 0.4567G}$$

حيث:

GL = إجمالي الفاقد من الركام (بوصة).

B = عدد حالات الكشط.

LATD = متوسط المرور اليومي في المسار التصميمي (ويُستخدم إجمالي المرور في كلا الاتجاهين بالنسبة للطريق أحادي المسار).

R = متوسط نصف قطر المنحنيات (قدم).

G = القيمة المطلقة للميل (٪).

المعادلة (٨-٣)

$$AGL = \left[{T^2}/{(T^2 + 50)}\right] \times f \times (4.2 + 0.092 \times T + 0.889 \times R^2 + 1.88 \times VC)$$

حيث:

AGL = الفاقد السنوي من الركام.

T = الحجم المروري السنوي في كلا الاتجاهين (آلاف المركبات).

R = المعدل السنوي لتساقط الأمطار (بوصة).

VC = متوسط النسبة المئوية لميل الطريق.

f = ٠,٠٣٧ لحصى اللاتريت (lateritic)، ٠,٠٤٣ لحصى الكوارتزيت (quartzitic). ٠,٠٢٨ للحصى البركاني (volcanic) و ٠,٠٥٩ للحصى المرجاني (coral).

ويُقترح استخدام المعلومات المحلية -كلما أمكن ذلك- بشأن الفاقد في الركام بوصفها مدخلات في الطريقة.

٨-١-٤ طريقة التصميم:

تُتبع الخطوات التالية لتصميم الطرق ذوات الأسطح الركامية.

١- حدد أربعة مستويات من سماكة طبقة الأساس الركامية، D_{BS}. ينبغي تجهيز أربعة جداول منفصلة، مماثلة للجدول (٨-١). أدخل سمك طبقة الأساس لكل من المحاولات التجريبية الأربع في الزاوية اليسرى العلوية لكل من الجداول الأربعة.

٢- أدخل قيمة الفاقد في قابلية الخدمة للتصميم فضلاً عن قيمة التخدد المسموح به في المربعات المناسبة في كل من الجداول الأربعة.

٣- أدخل معامل المرونة الموسمي المناسب للقاعدة الترابية (M_R) ولمواد طبقة الأساس الركامية (E_{BS}) في العمودين ٢ و ٣ على التوالي في الجدول (٨-١). وقد تكون قيم معامل طبقة الأساس متناسبة مع معامل المرونة للقاعدة الترابية خلال موسم معين. غير أنه يمكن استخدام قيمة ثابتة.

٤- أدخل المرور الموسمي بمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) في العمود ٤. وبافتراض أن مرور الشاحنات موزع بالتساوي على مدار العام، فعندئذٍ ينبغي استخدام أطوال الفصول بحيث تتناسب مع إجمالي مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) المتوقعة مع كل فصل.

٥- في كل جدول من الجداول الأربعة، قدر المرور المسموح به من مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) لكل موسم، وذلك باستخدام الرسم البياني (nomograph) الخاص بقابلية الخدمة الموضح بالشكل (٨-١) ثم أدرجه في العمود ٥.

٦- في كل جدول من الجداول الأربعة، قدر المرور المسموح به من مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL)، وذلك باستخدام الرسم البياني (nomograph) الخاص بالتخدد الموضح بالشكل (٨-٢) ثم أدرجه في العمود ٧.

٧- في كل جدول من الجداول الأربعة، احسب قيم التلفيات الموسمية لمعايير قابلية للخدمة عن طريق قسمة المرور الموسمي المتوقع (العمود ٤) على المرور المسموح به خلال ذلك الموسم (العمود ٥). أدخل قيم هذه التلفيات الموسمية المقابلة لمعايير قابلية للخدمة في العمود ٦. وبعدئذٍ، اتبع نفس التعليمات بالنسبة لمعايير التخدد، أي بقسمة العمود ٤ على العمود ٧ وإدخال الناتج في العمود ٨.

٨- احسب التلفيات الإجمالية لكلا معياري قابلية الخدمة والتخدد عن طريق إضافة التلفيات الموسمية. وعند الانتهاء من ذلك في جميع الجداول الأربعة (المقابلة لسماكة طبقات الأساس في المحاولات التجريبية الأربع)، ينبغي إعداد رسم بياني للتلفيات الكلية مقابل سماكة طبقة الأساس. ويُحدد متوسط سماكة طبقة الأساس المطلوبة ($\overline{D}_{BS}$) بالاستيفاء (interpolation) في هذا الرسم البياني لإجمالي تلفيات يساوي ١.

٩- ينبغي استخدام سماكة طبقة الأساس المحددة في الخطوة ٨ للتصميم إذا كانت تأثيرات فاقد الركام لا تذكر. غير أنه إذا كانت نسبة فقد الركام كبيرة، فعندئذٍ تُحدد سماكة التصميم بتطبيق المعادلة التالية:

المعادلة (٨-٤)

$$\boldsymbol{D_{BS} = \overline{D}_{BS} + (0.5 \times GL)}$$

حيث:

GL = الإجمالي التقديري للفاقد من الركام خلال فترة الأداء (بوصة).

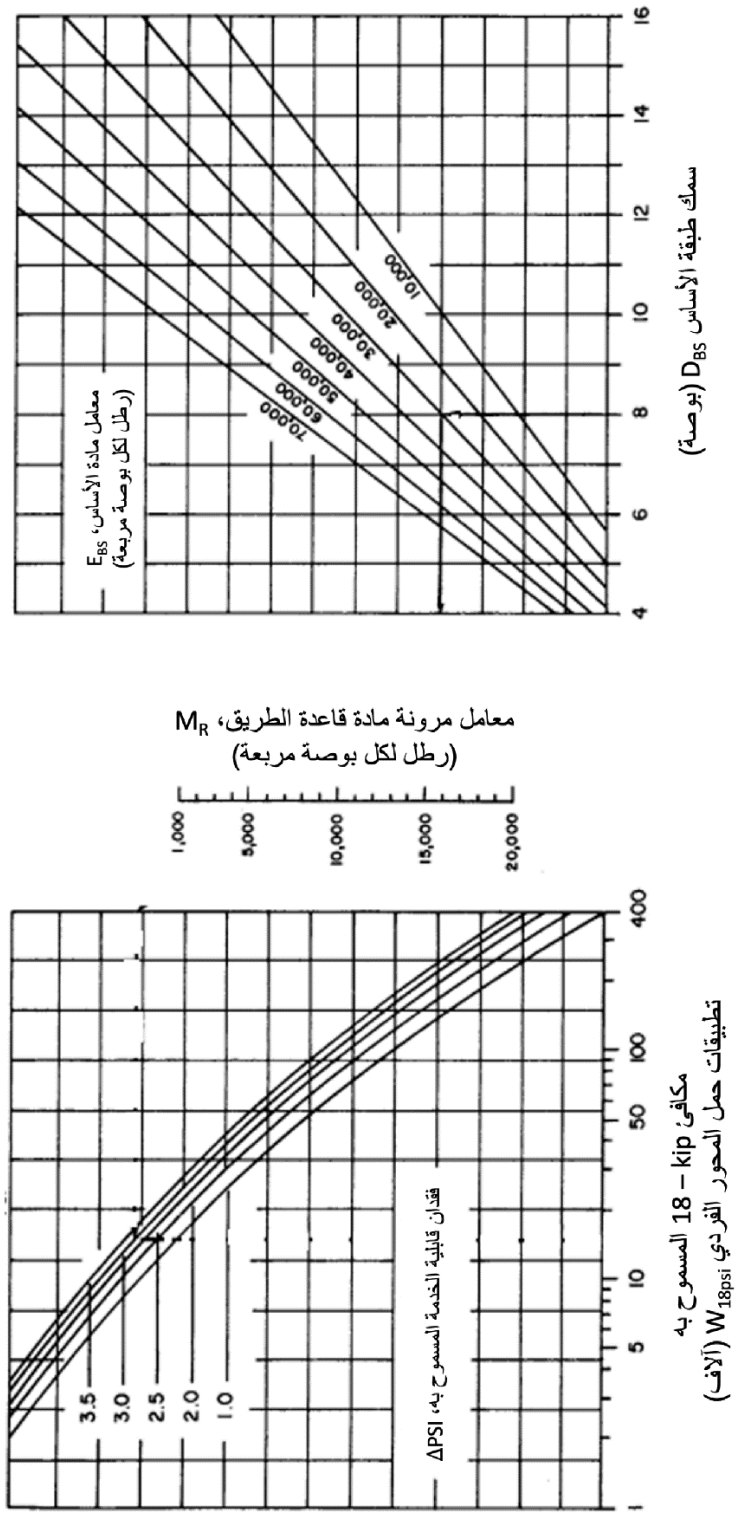
١٠- تتمثل الخطوة الأخيرة في تحويل جزء من سماكة طبقة الأساس الركامية إلى سماكة مكافئة لمادة طبقة ما تحت الأساس. ويتحقق ذلك بالمساعدة التي يوفرها الشكل (٨-٣). اختر السماكة المرغوبة لطبقة الأساس النهائية (D_{BS-f}). ارسم خطًا للمعامل المقدر لمادة طبقة ما تحت الأساس،E_{SB}. استمر أفقيًا وعبر المقياس المقابل للانخفاض في سماكة طبقة الأساس، (D_{BS}- D_{BS-f}). ثم حدد السماكة المطلوبة لطبقة ما تحت الأساس D_{SB} (بوصة) بالنسبة للمعامل المعلوم لمادة طبقة الأساس.

ويرد مثال للطرق ذوات الأسطح الركامية في الملحق (ز).

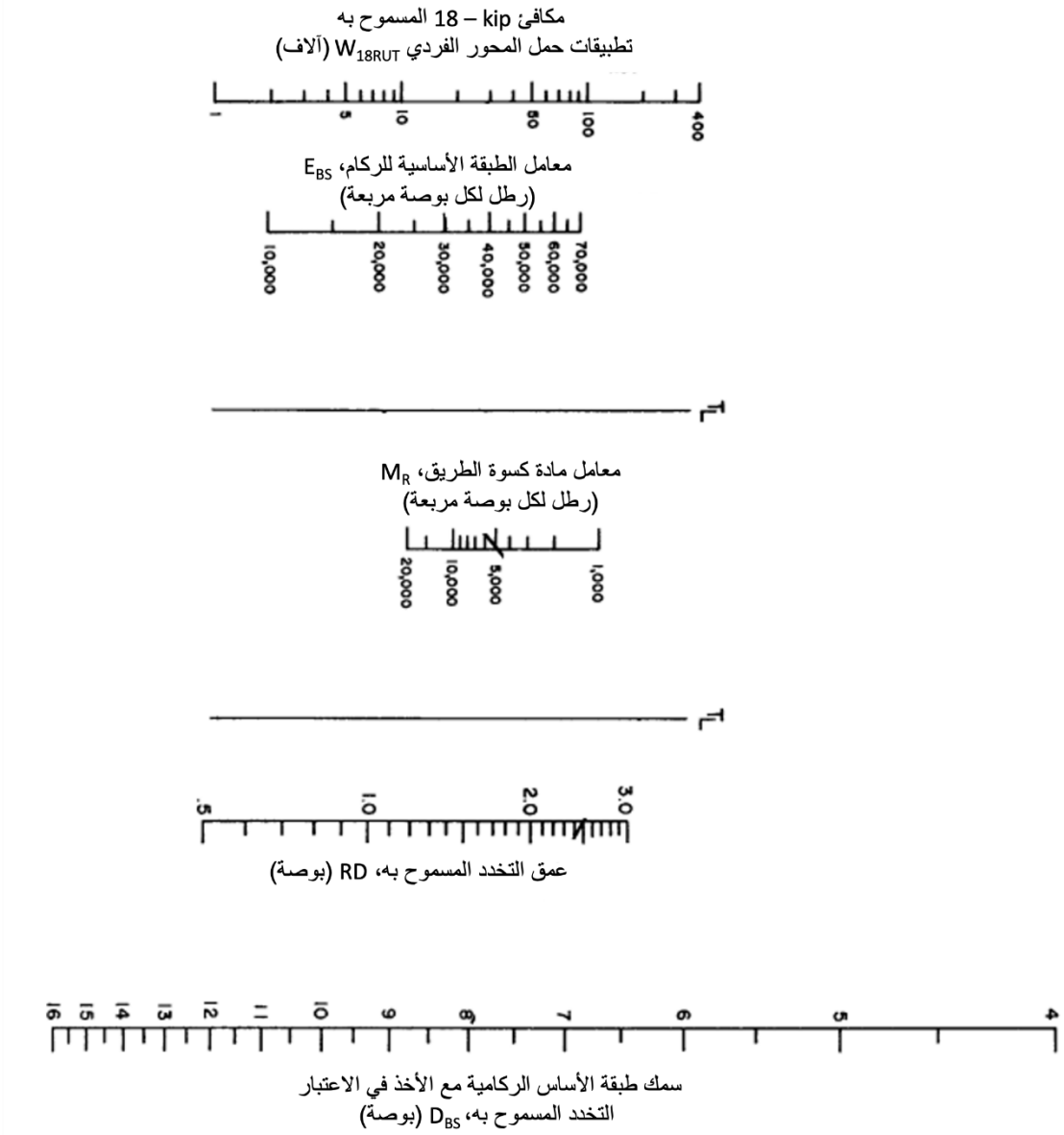
يُسمح بتثبيت القاعدة الترابية (الجزء الفرعي ٣-١-٨) أو طبقة ما تحت الأساس أو طبقة الأساس (الجزء ٣-٣) للطرق غير المُعبّدة بشرط أن يتمكن المهندس من تبرير المدخلات الخاصة بالتصميم.

الجدول (٨–١) مُخطط لحساب تلفيات الرصف الإجمالية استنادًا إلى سماكة الأساس الركامي في المحاولة التجريبية.

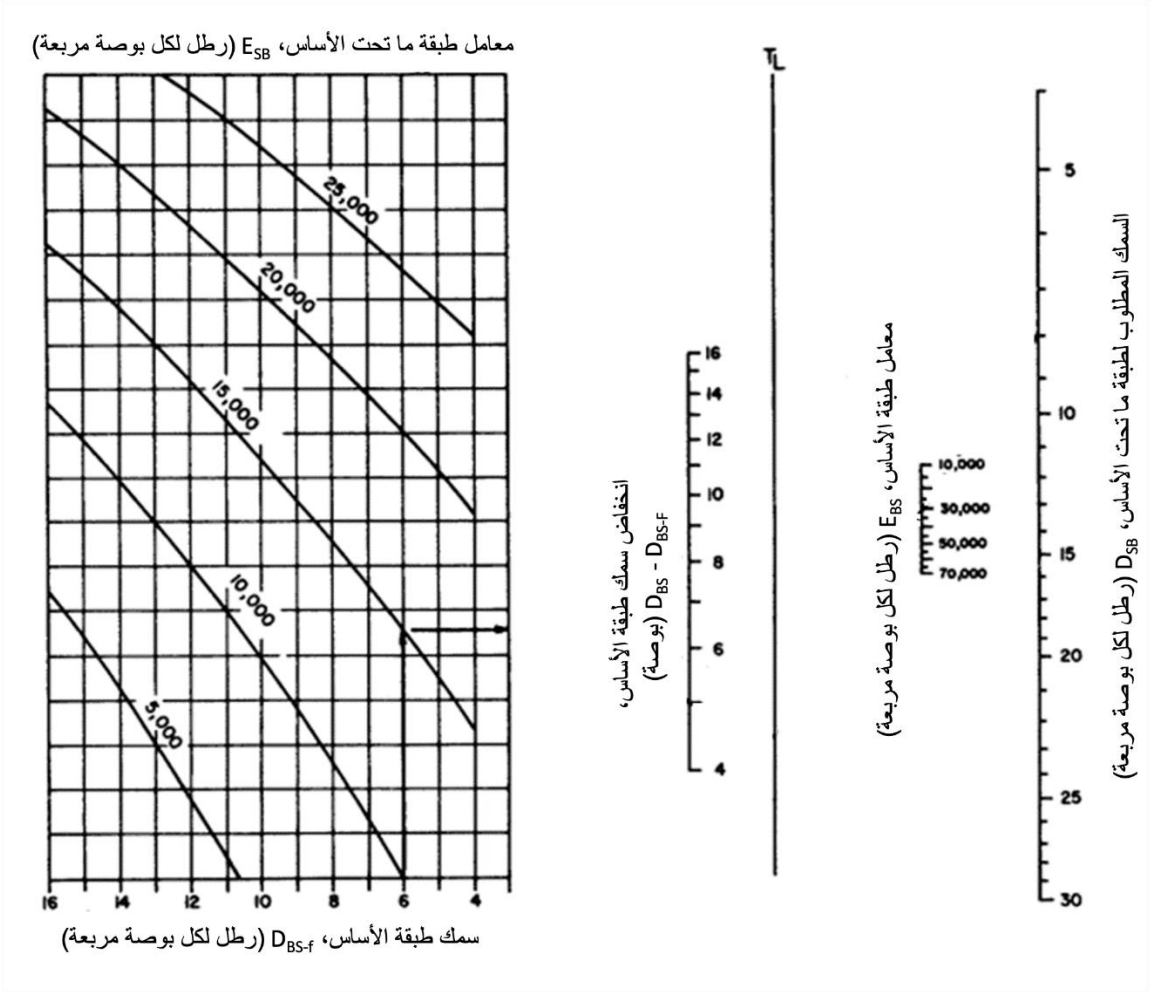
سمك الأساس للمحاولة التجريبية، D_{BS} (بوصة) =				معايير قابلية الخدمة ΔPSI =		معايير التخدد RD (بوصة) =	
(١) حالة رطوبة القاعدة الترابية (مواسم)	(٢) معامل مرونة القاعدة الترابية، M_R (رطل لكل بوصة مربعة)	(٣) معامل مرونة الأساس، E_{BS} (رطل لكل بوصة مربعة)	(٤) المرور المتوقع للحمل المكافئ أحادي المحور، w_{18}	(٥) المرور المسموح به للحمل المكافئ أحادي المحور، $(W_{18})_{PSI}$	(٦) التلفيات الموسمية $(W_{18})_{PSI} \setminus w_{18}$	(٧) الحركة المرور المسموح بها للحمل المكافئ أحادي المحور، $(W_{18})_{RUT}$	(٨) التلفيات الموسمية $(W_{18})_{RUT} \setminus w_{18}$
مشبعة							
رطبة							
جافة							
	المرور الإجمالي =			التلفيات الإجمالية =		التلفيات الإجمالية =	



الشكل (٨–١) مخطط تصميمي للطرق المكسوة بالركام مع الأخذ في الاعتبار الفاقد في قابلية الخدمة المسموح به (AASHTO, 1993).



الشكل (٨–٢) مخطط تصميمي للطرق المكسوة بالركام مع الأخذ في الاعتبار التخدد المسموح به (AASHTO, 1993).



الشكل (٨–٣) مُخطط لتحويل جزء من سماكة طبقة الأساس الركامية إلى سماكة مكافئة لطبقة ما تحت الأساس (AASHTO, 1993).

٨-٢ الطرق منخفضة الحجم المروري:

يغطي هذا الجزء تصميم الطرق منخفضة الحجم المروري للرصفيات المرنة والصلبة باستخدام طريقة تعتمد على رسومات بيانية تصميمية (nomograph) تتبع طريقة (AASHTO) التجريبية للتصميم (AASHTO, 1993). علمًا بأن طريقة الرسومات البيانية التصميمية لرصف الطرق منخفضة الحجم المروري هي في الأساس نفس طريقة تصميم رصف الطرق. وتعتمد طريقة الطرق منخفضة الحجم المروري بشكل أساسي على مجموعة من المتطلبات التصميمية والتي نوقشت في البابين (٥) و (٦) من هذا المجلد.

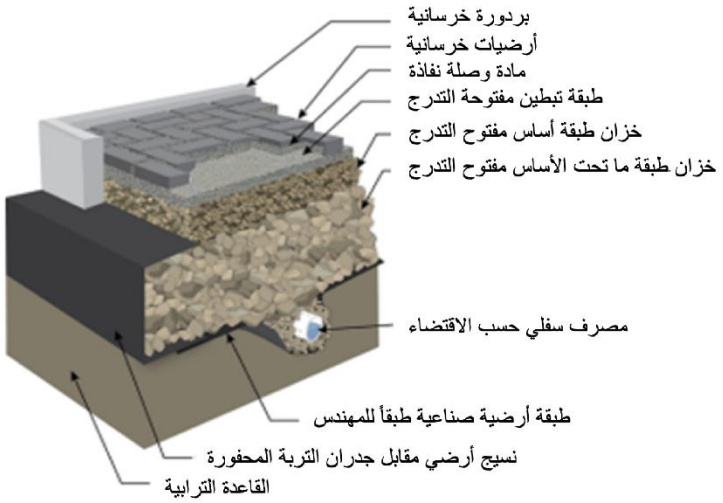
والاختلاف الأساسي في تصميم الطرق منخفضة الحجم المروري هو مستوى الموثوقية التي يمكن استخدامه. ونظرًا للانخفاض النسبي في استخدامها وتدني مستوى المخاطر المقترنة بها، فإن مستوى الموثوقية الموصى به لتصميم رصف الطرق منخفضة الحجم المروري هو ٥٠٪.

٨-٣ رصفيات لأغراض خاصة:

٨-٣-١ الرصفيات المتداخلة:

٨-٣-١-١ ٨-٣-١-١ نموذج الرصف:

يتألف الرصف الخرساني المتداخل النفاذ، ويُشار إليه أيضًا باسم (PICP) من وحدات رصف خرسانية صلبة ذات وصلات توجد فتحات في سطح الرصف عند تجميعها بأي نمط. وتُحشى الوصلات بالركام النّفاذ للسماح بدخول المياه بحرية من السطح. وتُوضَع وحدات الرصف على طبقة تبطين من الركام النّفاذ الذي يستند على طبقة أساس وطبقة ما تحت أساس من الركام مفتوح التدرج. وتُحجز الأرضيات الخرسانية وطبقات التبطين والأساس -عادةً- ببردورة خرسانية لتقييد حركتها مع مرور المركبات. وتقوم طبقتا الأساس وما تحت الأساس بتخزين المياه والسماح لها بالتغلغل في القاعدة الترابية. وتُستخدم المصارف السفلية المُثقبة في طبقتي الأساس وما تحت الأساس لإزالة المياه. كما تُوضع طبقات أرضية صناعية (Geosynthetics) مثل: الأنسجة الأرضية (geotextiles) أو الشبكات الأرضية (geogrids) أو الأغشية الأرضية (geomembranes) في القاعدة الترابية استنادًا إلى أهداف التصميم الإنشائي والهيدرولوجي، وتُستخدَم أنسجة الفصل الأرضية على جوانب طبقة الأساس/ ما تحت الأساس لتفادي دخول الحبيبات الدقيقة من التربة المجاورة، ويوضح الشكل (٨-٤) مكونات الرصف الخرساني المتداخل النفاذ.



الشكل (٨–٤) المقطع العرضي النمطي للرصف الخرساني المتداخل النفاذ (FHWA-HIF-19-021, 2019).

ويُستخدَم الرصف الخرساني المتداخل النفاذ في ممرات المشاة والمداخل الجانبية ومواقف السيارات والأزقة والطرق منخفضة السرعة وأكتاف الطرق، وهي مخصصة للمناطق التي لا تزيد السرعة فيها عن ٥٠ كم/ ساعة. ويُستخدَم الرصف الخرساني المتداخل النفاذ -عمومًا- في المناطق المعرضة لأحمال تقل عن مليون واحد من مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) على مدار عمرها. وينبغي عدم استخدامه في المناطق المجاورة لمناطق تحميل/تفريغ أو تخزين مواد خطرة. كما أنه -عمومًا- لا يوضع في مناطق جداول المياه الموسمية ذات الأعماق الكبيرة.

٨-٣-١-٢ المواد:

تمتثل الأرضيات الخرسانية للمواصفة (ASTM C936). تُستخدم الوحدات بسُمك ٨٠ ملم، (3 1/8) بوصة، بحد أدنى في مناطق المركبات، ويمكن استخدام وحدات بسمك ٦٠ ملم، (2 3/8) بوصة، في مناطق المشاة، وبناءً على عرضها، تُحشى الوصلات بركام نفّاذ صغير الحجم، مثل الحجر (ASTM 8) أو (ASTM 89) أو (ASTM 9) طبقًا لمواصفة (ASTM D448) أو (AASHTO M43).

إن سمك طبقة التبطين عادةً ما يكون ٥٠ مم (٢ بوصة)، وتوفر طبقة تبطين مستوية للأرضيات، وتتكون من ركام صغير الحجم مفتوح التدرج، عادةً ما يُستخدم الحجر المطابق لمواصفة (ASTM) رقم: ٨ أو مواد مشابهة له في الحجم.

إن خزان طبقة الأساس ذا التدرج المفتوح عبارة عن طبقة من الركام بسمك ١٠٠ ملم (٤ بوصة) ومصنوع من الحجر المُكسر، بشكل أساسي الذي ينحدر من ٢٥ مم إلى ١٣ ملم (١ بوصة إلى ٠,٥ بوصة)، وبجانب تخزين المياه، توفر هذه الطبقة عالية النفاذية انتقالًا انشائيًا بين طبقة التبطين وطبقة ما تحت الأساس الركامية، ويكون حجم الحجر لطبقة الأساس -نمطيًا- مطابقًا لـ (ASTM) رقم: 57 أو مواد مشابهة له في الحجم.

إن أحجام الأحجار في خزان طبقة الأساس ذا التدرج المفتوح أكبر من تلك الموجودة في طبقة الأساس، والتي بشكل أساسي تنحدر من ٧٥ ملم إلى ٥٠ ملم (٣ بوصة نزولًا إلى ٢ بوصة)، ويكون عادةً من الحجر المطابق لـ (ASTM) رقم: ٢ أو ٣ أو ٤. وعلى غرار طبقة الأساس. تُخزَّن المياه في الفراغات بين الأحجار. ويعتمد سُمك طبقة ما تحت الأساس على متطلبات تخزين المياه والأحمال المرورية، ويمكن ألا تتطلب تطبيقات مسارات المشاة أو المداخل الجانبية السكنية طبقة ما تحت أساس، وفي هذه الحالات يُزاد سُمك طبقة الأساس لتوفير تخزين المياه والدعم.

كما ذُكر أعلاه، تتألف الطبقات الأرضية الصناعية من الأنسجة الأرضية أو الشبكات الأرضية أو الأغشية الأرضية. ويمكن للأنسجة الأرضية أن تفصل طبقة ما تحت الأساس عن القاعدة الترابية، وأن تساعد في منع انتقال التربة إلى طبقة ما تحت الأساس أو طبقة الأساس الركامية، وعند وضعها بشكل أفقي، ينبغي أن تكون مصممة لتطبيقات الصرف السطحي، وأن تُختار بعناية وتُقيَّم من حيث احتمال الانسداد. وتُوضَع أنسجة الفصل الأرضية رأسيًا على جوانب طبقة الأساس/ ما تحت الأساس في التصميمات التي لا تستخدم بردورات بالعمق الكامل أو مقابل المنشئات الأخرى. ينبغي أن تكون الأنسجة الأرضية مطابقة للمواصفة (AASHTO M288). يمكن استخدام الشبكات الأرضية أو الخلايا الأرضية في دعم طبقة ما تحت الأساس في أنواع التربة ذات القوة المنخفضة جدًا، أي نسبة تحميل كاليفورنيا أقل من ٢٪، في حين تقوم مادة الغشاء الأرضي بتطويق الهيكل الإنشائي للرصف، وتُستخدم في التصميمات عديمة التسرب، وينبغي استشارة الجهات المُصنعة للطبقات الأرضية الصناعية بشأن الاختيار الموصى به للمواد والسُمك.

٨-٣-١-٢ ٨-٣-١-٣ التصميم الإنشائي:

بالنسبة للتصميم الإنشائي للرصفيات المتشابكة تُستخدَم طريقة (AASHTO) التجريبية لعام ١٩٩٣ (راجع الجزء ٥-٢)، وينبغي إيلاء اعتبار خاص لاستخدام معاملات الطبقة لطبقات الأساس/ ما تحت الأساس الركامية ذات التدرج المفتوح التي تكون أقل من تلك المستخدمة عادةً لطبقات الأساس ذات التدرج الكثيف. وتتعلق طريقة التصميم الإنشائي هذه برصف الطرق ومواقف السيارات. أما بالنسبة لتصميم رصفيات المهام الشاقة، مثل: رصفيات الموانئ والمطارات؛ فراجع أدلة معهد الرصف الخرساني المتشابك التي تحمل عنوان (تصميم الرصف في الموانئ والمناطق الصناعية للأرضيات الخرسانية، وتصميم رصفيات مهابط الطائرات ذات الأرضيات الخرسانية).

٨-٣-٢ تصميم مواقف السيارات:

قد يكون هيكل رصف مواقف السيارات من النوع المرن (الشكل ٢-٢) أو الصلب (الشكل ٢-٣)، وبالنسبة لتصميم الرصف المرن، يجب استخدام الطريقة التجريبية لتصميم الرصف المعروضة في الجزء (٥-٢)، أما بالنسبة لتصميم الرصف الصلب؛ فيمكن تحديد المقطع العرضي للرصف من خلال المنهجية الموضحة في الدليل (ACI 330R-08)، وبالنسبة لتصميم سُمك رصفيات مواقف السيارات، يمكن استخدام الجدولين (٨-٢) و(٨-٣).

ويسرد الجدول (٨-٢) الفئات المرورية الأربع المختلفة التي تتراوح من سيارات الركاب والشاحنات الخفيفة إلى الشاحنات الثقيلة، ويعطي الجدول (٨-٣) سمك الرصف الموصى به للأعداد الكبيرة والصغيرة من الشاحنات يوميًا في أربع فئات مرورية مختلفة وست فئات مختلفة من دعم القاعدة الترابية التي تتراوح من عالية جدًا إلى منخفضة، ويُحدَّد دعم القاعدة الترابية من خلال ما يلي:

- معامل رد فعل القاعدة الترابية (k) وهو نسبة الحمل لكل وحدة مساحة من التربة إلى الهبوط المقابل للتربة، وتُقيَّم عادةً في الموقع طبقًا للمواصفة (ASTM D1196).
- نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR).
- قيمة المقاومة (R) – استقرار التربة المحدد طبقًا للمواصفة (ASTM D2844) باستخدام "مقياس استقرار هفيم" (Hveem Stabilometer)، الذي يقيس الضغط الأفقي الناتج عن حمل رأسي. (الاستقرار يمثل مقاومة القص للتشوه اللدن لتربة مشبعة عند كثافة معينة).

يمكن تطبيق القيم المرتفعة من دعم القاعدة الترابية على طبقات ما تحت الأساس المعالجة أو الرصف المرن القائم، ويستند السُمك المعروض إلى قوى الانحناء (معامل التمزق: (Sc) طبقًا للمواصفة (ASTM C78) التي تتراوح من ٣,٥ إلى ٤,٥ ميجا باسكال (٥٠٠ إلى ٦٥٠ رطل لكل بوصة مربعة) عند ٢٨ يومًا، والذي يقابل قوى الضغط التي تتراوح بين ٢٤ و ٣٤ ميجا باسكال (٣٥٠٠ إلى ٥٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) تقريبًا استنادًا إلى تقديرات تقريبية للعلاقة بين قوة الضغط وقوة الانحناء.

الجدول (٨–٢) فئات المرور (ACI 330R-08).

الوصف	الفئة	
مناطق مواقف السيارات ومسارات الوصول	أ	
مدخل مركز التسوق ومسارات الخدمة	ب	
مناطق مواقف الحافلات وحافلات النقل العام الحضري وحافلات المدارس	ب	
منطقة مواقف السيارات والمسارات الداخلية	ب	
مسارات المداخل والمسارات الخارجية	ج	
مناطق مواقف الشاحنات	ب أو ج أو د	
نوع الشاحنة	مناطق المواقف والمسارات الداخلية	مسارات المداخل والمسارات الخارجية
وحدات فردية (شاحنات ذات رأس قاطر)	ب	ج
وحدات متعددة (وحدات قاطرة بمقطورة واحدة أو أكثر)	ج	د

الجدول (٨–٣) توصيات سُمك التصميم لعمر عشرين عامًا (بدون قضبان وتدية) (ACI 330R-08).

		معامل رد فعل القاعدة الترابية = 135 ميجا باسكال/ م (500 رطل لكل بوصة مربعة/ بوصة) (نسبة تحمل كاليفورنيا = 50، قيمة المقاومة = 86)				معامل رد فعل القاعدة الترابية = 108 ميجا باسكال/ م (400 رطل لكل بوصة مربعة/ بوصة) (نسبة تحمل كاليفورنيا = 38، قيمة المقاومة = 80)			
معامل التمزق، ميجا باسكال (رطل لكل بوصة مربعة)		4.5 (650)	4.14 (600)	3.8 (550)	3.5 (500)	4.5 (650)	4.14 (600)	3.8 (550)	3.5 (500)
الفئة المرورية[1]	أ (ADTT = 1)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)
	أ (ADTT = 10)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)
	ب (ADTT = 25)	102 ملم (4 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)
	ب (ADTT = 300)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)
	ج (ADTT = 100)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)
	ج (ADTT = 300)	127 ملم (5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)
	ج (ADTT = 700)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)
	د[2] (ADTT = 700)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)
		معامل رد فعل القاعدة الترابية = 81 ميجا باسكال/ م (300 رطل لكل بوصة مربعة/ بوصة) (نسبة تحمل كاليفورنيا = 26، قيمة المقاومة = 67)				معامل رد فعل القاعدة الترابية = 54 ميجا باسكال/ م (200 رطل لكل بوصة مربعة/ بوصة) (نسبة تحمل كاليفورنيا = 10، قيمة المقاومة = 48)			
معامل التمزق، ميجا باسكال (رطل لكل بوصة مربعة)		4.5 (650)	4.14 (600)	3.8 (550)	3.5 (500)	4.5 (650)	4.14 (600)	3.8 (550)	3.5 (500)
الفئة المرورية[1]	أ (ADTT = 1)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)
	أ (ADTT = 10)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	102 ملم (4 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)
	ب (ADTT = 25)	114 ملم (4.5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)
	ب (ADTT = 300)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)
	ج (ADTT = 100)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)
	ج (ADTT = 300)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)

	ج (ADTT = 700)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)
	د[2] (ADTT = 700)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)
		معامل رد فعل القاعدة الترابية = 27 ميجا باسكال/ م (100 رطل لكل بوصة مربعة/ بوصة) (نسبة تحمل كاليفورنيا = 3، قيمة المقاومة = 18)				**معامل رد فعل القاعدة الترابية = 13.5 ميجا باسكال/ م (50 رطل لكل بوصة مربعة/ بوصة) (نسبة تحمل كاليفورنيا = 2، قيمة المقاومة = 5)**			
	معامل التمزق، ميجا باسكال (رطل لكل بوصة مربعة)	**4.5 (650)**	**4.14 (600)**	**3.8 (550)**	**3.5 (500)**	**4.5 (650)**	**4.14 (600)**	**3.8 (550)**	**3.5 (500)**
الفئة المرورية[1]	أ (ADTT = 1)	102 ملم (4 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	114 ملم (4.5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)
	أ (ADTT = 10)	114 ملم (4.5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	127 ملم (5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)
	ب (ADTT = 25)	140 ملم (5.5 بوصة)	140 ملم (5.5 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)
	ب (ADTT = 300)	152 ملم (6 بوصة)	152 ملم (6 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	190 ملم (7.5 بوصة)
	ج (ADTT = 100)	152 ملم (6 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	190 ملم (7.5 بوصة)	190 ملم (7.5 بوصة)
	ج (ADTT = 300)	165 ملم (6.5 بوصة)	165 ملم (6.5 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	190 ملم (7.5 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	190 ملم (7.5 بوصة)	190 ملم (7.5 بوصة)	203 ملم (8 بوصة)
	ج (ADTT = 700)	165 ملم (6.5 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	190 ملم (7.5 بوصة)	178 ملم (7 بوصة)	190 ملم (7.5 بوصة)	203 ملم (8 بوصة)	216 ملم (8.5 بوصة)
	د[2] (ADTT = 700)	203 ملم (8 بوصة)	203 ملم (8 بوصة)	203 ملم (8 بوصة)	203 ملم (8 بوصة)	229 ملم (9 بوصة)	229 ملم (9 بوصة)	229 ملم (9 بوصة)	229 ملم (9 بوصة)

ملحوظات:
١- ADDT = متوسط المرور اليومي للشاحنات، وتُعرف الشاحنة بأنها مركبة ذات ست عجلات على الأقل؛ وتُستثنى منها شاحنات "الفان" بدون نوافذ والشاحنات الصغيرة وغيرها من المركبات ذات الأربع عجلات.
2- يمكن تقليل سمك الفئة (د) (فقط) بمقدار 25 ملم (1.0 بوصة) إذ استخدمت قضبان وتدية في جميع الفواصل المستعرضة (وهي الفواصل المتعامدة مع اتجاه المرور).

٨-٤ الأكتاف:

نمطيًا، يكون كل من مسار الطوارئ والمسار الذي يقود لمخرج من الطريق والمسار المؤقت هو كتف الطريق نفسه. الكتف هو ذلك الجزء من الطريق الملاصق لطريق السير لاستيعاب المركبات المتوقفة في حالات الطوارئ. يشار إلى الكتف عمومًا باسم القسم المرصوف بجوار الخط الرئيس. توفر الأكتاف الدعم الجانبي لطبقة الأساس والطبقة السطحية للخط الرئيس، وتعزز الصرف السطحي، وتوفر مسارًا مؤقتًا لاستخدام المرور في أوقات الذروة وتُميز حافة الطريق. تستخدم بعض الأكتاف كمسارات بديلة أثناء إنشاء رصفيات الطرق. أيضا، تُستخدم من قبل مرور معدات الصيانة.

ينبغي أن تكون الأكتاف متينة، ومتوافقة مع رصف الخط الرئيس المجاور، وقوية بما يكفي للتعامل مع دخول الشاحنات الثقيلة إليها، وتتحمل مرور معدات الصيانة، وتكون على نفس الجدول الزمني للصيانة مثل الخط الرئيس.

عادةً ما يكون للأكتاف المرصوفة قدرة إنشائية أقل من الخط الرئيس. عندما لا يكون الكتف ذو العمق الكامل ضروريًا، ينبغي أن يُبنى هيكل رصف الكتف على ما يعادل ٢,٥ ٪ من مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد التصميمي (ESAL)، كحد أدنى (VDOT, 2003). للمساعدة في ضمان صرف إيجابي تحت السطح، ينبغي أن يكون عمق الرصف الكلي للكتف مساويًا لعمق الهيكل الإنشائي لرصف الخط الرئيس.

٨-٥ الرصفيات في المواقع المرتفعة مستوى المياه الجوفية:

يؤدي ارتفاع منسوب المياه الجوفية إلى تأثيرات ضارة على طبقة أساس الطريق والرصف بأكمله، ولتجنب المشكلات المتعلقة بالرطوبة، ينبغي أن يكون أحد الأهداف الرئيسة في تصميم الرصف هو السعي لمنع تشبع طبقة ما تحت الأساس والقاعدة الترابية وغيرها من مواد الرصف الحساسة، أو حتى تعرضها لمستويات عالية من الرطوبة باستمرار. وتتضمن الأساليب الشائعة للتحكم في المشكلات التي تسببها الرطوبة أو الحد منها ما يلي:

- استخدام مواد وتصميمات ذات سمات غير حساسة لتأثيرات الرطوبة.
- الإزالة السريعة للرطوبة التي تدخل في نظام الرصف.

لا يمكن لأي نهج منفرد أن يلغي تمامًا تأثيرات الرطوبة على نظام الرصف تحت الحمل المروري الكثيف على مدار عدة أعوام، وبالتالي من الضروري في كثير من الأحيان أن يُستعان بجميع الأساليب مجتمعةً لحالات التصميم الحرجة.

وتشمل الطرق الأكثر شيوعًا لتحسين القاعدة الترابية من أجل تقليل تأثيرات الرطوبة تثبيت القاعدة الترابية (الجزء الفرعي ٣-١-٨) واستخدام الشبكات الأرضية والأنسجة الأرضية (الجزء الفرعي ٣-١-٩).

تُزال الرطوبة التي تدخل الرصف من خلال الصرف في القاعدة الترابية (الجزء الفرعي ٣-١-٦)، وقد يكون لنظام مصارف لسفلية، يُركب لإزالة المياه الزائدة، ميزة مفيدة جدًا في التصميم العام للطريق (انظر الجزء ٦-١٣ من كود الطرق السعودي ٣٠٢: الهيدرولوجيا والتصميم الهيدروليكي).

٨-٦ تطبيقات المواد البديلة في تصميم الرصف:

٨-٦-١ المواد:

يمكن تحقيق الاستدامة والمزايا البيئية عند استخدام المواد المعاد تدويرها/المنتجات الجانبية (by-products) بكفاءة في تطبيقات إنشاء الطرق؛ نظرًا لتقليل كل من استخدام الطاقة والانبعاثات وترشيح الملوثات إلى الأرض. وبالإضافة إلى ذلك يُقلل كل من احتمال الاحتباس الحراري، واستهلاك الطاقة والمياه، والنفايات الخطرة، ويرد ملخص لمختلف المواد المعاد تدويرها/ المنتجات الجانبية في الجدول (٨-٤).

الجدول (٨–٤) تطبيقات المواد البديلة في إنشاء الطرق (FHWA, 2008).

التطبيق/ الاستخدام	المواد
الخرسانة الأسفلتية – الركام (الأسفلت المخلوط على الساخن).	خبث حبيبات الأفران. رماد قاع الفحم. خبث غلايات الفحم. الرمل المسبك. مخلفات معالجة المعادن. النفايات البلدية الصلبة. رماد غرفة الاحتراق. الخبث غير الحديدي. رصف الأسفلت المستصلح (RAP). خردة ألواح التسقيف. الإطارات الخردة. خبث الحديد. مخلفات الزجاج.
الخرسانة الأسفلتية – الركام (الأسفلت المخلوط على البارد).	رماد قاع الفحم. رصف الأسفلت المستصلح (RAP).
الخرسانة الأسفلتية – الركام (طبقة التكسية العازلة أو معالجة السطح).	خبث حبيبات الأفران. خبث غلايات الفحم. خبث الحديد.
الخرسانة الأسفلتية – المادة المالئة المعدنية.	غبار المرشحات الكيسية. رماد الحمأة. غبار فرن الأسمنت. غبار فرن الجير. رماد الفحم المتطاير.
الخرسانة الأسفلتية – المُعدِّل الأسمنتي للأسفلت.	خردة ألواح التسقيف. الإطارات الخردة. مخلفات البلاستيك. البوليمرات المستصلحة.
خرسانة الأسمنت البورتلاندي – الركام	الخرسانة المستصلحة.
خرسانة الأسمنت البورتلاندي – المواد الأسمنتية المُكمّلة.	رماد الفحم المتطاير. خبث حبيبات الأفران.
الأساس الحبيبي.	خبث حبيبات الأفران. رماد قاع الفحم. خبث غلايات الفحم. مخلفات معالجة المعادن. النفايات البلدية الصلبة.

التطبيق/ الاستخدام	المواد
	رماد غرفة الاحتراق. الخبث غير الحديدي. رصف الأسفلت المستصلح. الخرسانة المستصلحة. خبث الحديد. مخلفات الزجاج.
جسر الطريق أو الردم.	رماد الفحم المتطاير. مخلفات معالجة المعادن. الخبث غير الحديدي. رصف الأسفلت المستصلح. الخرسانة المستصلحة. الإطارات الخردة.
طبقة الأساس المُثبتة – الركام.	رماد قاع الفحم. خبث غلايات الفحم.
طبقة الأساس المُثبتة – المواد الأسمنتية (البوزولان أو مادة منشطة للبوزولان أو مادة ذاتية التماسك).	غبار الفحم المتطاير. غبار فرن الأسمنت. غبار فرن الجير. مخلفات الكبريت.

يتطلب أي اقتراح لإدراج مادة غير تقليدية - وعلى وجه التحديد المخلفات أو المنتجات الجانبية في الهيكل الإنشائي للرصف، بالإضافة إلى التقييم الهندسي- تقييمًا لقضايا البيئة والسلامة والصحة المهنية وقابلية إعادة التدوير والاقتصاد وقضايا القدرة على التنفيذ، ويجب تناول جميع هذه القضايا قبل تحديد قبول هذه المواد من عدمه. ويعد مثل هذا التقييم معقدًا بسبب عدد التخصصات الفنية وكذلك الاعتبارات المؤسسية التي يجب إدراجها في العملية.

بوجه عام، لا توجد إجراءات موثقة، بما في ذلك اختبارات التقييم وإجراءات التقدير ومعايير تناول الكثير من القضايا المذكورة آنفًا.

٨-٦-٢ إطار التقييم:

٨-٦-٢-١ عملية التقييم:

توجد ست خطوات رئيسة ينبغي مراعاتها في عملية تقييم المواد غير التقليدية (FHWA, 2008):

١- حدد جميع مسائل الهندسة والبيئة والصحة والسلامة المهنية، وقابلية إعادة التدوير، والقضايا الاقتصادية المرتبطة بالمواد المقترحة واستخدامها.

٢- أوجد طرق الاختبار والتقييم المعملية، والمعايير التي ينبغي أن تلبيها المادة والمنتج من أجل قبولها.

٣- اختبر وقيّم نتائج المواد والطلب، وإما وافق عليها أو ارفضها باستخدام الطرق والمعايير المحددة في الخطوة ٢.

٤- إذا كانت المادة لا تفي بالمعايير الموضوعة، انظر في إمكانية تعديل المادة أو المنتج قبل رفضها.

٥- حدد القضايا التي قد تفرض قيودًا كبيرة على قابلية تنفيذ الاقتراح.

٦- حدد ما إذا كان هناك حاجة للقيام بعرض توضيحي ميداني لتعزيز اختبارات ومعايير التقييم وتنفيذ العرض- حسب الاقتضاء-.

٨-٦-٢-٢ حدد القضايا ذات الصلة:

يمكن عادةً تحديد قضايا الهندسة والبيئة والصحة والسلامة المهنية وقابلية إعادة التدوير والقضايا الاقتصادية من خلال تجميع فريق مراجعة فني قادر على تحديد المتطلبات المحددة المرتبطة باستخدام مادة ما في الاستخدام المقترح.

وخلال مرحلة التخطيط هذه، ينبغي التركيز على تجميع وتقييم البيانات القائمة، والتي قد تشمل الاختبارات المعملية السابقة والعروض التوضيحية الميدانية وسجل تنفيذ المشاريع السابقة (بما في ذلك المشاريع في دول أخرى) التي استفادت من المواد المقترحة في التطبيق المقترح، وقد يكون إدراج البيانات القائمة في هذه العملية مفيدًا للغاية في مهمة تحديد جميع القضايا الفنية ذات الصلة وتجنب أي تكرار غير ضروري للجهود السابقة.

وفيما يلي بعض الأسئلة الهندسية الموصى بها التي ينبغي النظر فيها:

- ما الغرض من المادة في التطبيق المقترح؟

- ما هي الخواص الطبيعية أو الكيميائية المرتبطة بالمواد المقترحة التي قد يكون لها تأثير على جودة المنتج؟
- هل يمكن قياس تلك الخواص وتقييمها باستخدام طرق ومعايير اختبار المواد التقليدية؟

وفيما يلي بعض الأسئلة البيئية الموصى بها التي ينبغي النظر فيها:

- هل المواد ليست نفايات خطرة حسب تعريفها في المتطلبات التنظيمية؟
- ما هي المكونات الكيميائية أو الخصائص الطبيعية المرتبطة بالمنتج والتي قد تكون مصدر قلق بيئي؟
- ما هي العمليات التي قد تخضع لها المواد في أثناء المعالجة والإنتاج والإنشاء وعمر الخدمة والتي قد تؤدي إلى الإضرار بالبيئة؟

وفيما يلي بعض أسئلة الصحة والسلامة المهنية الموصى بها التي ينبغي النظر فيها:

- ما هي خواص المواد (الطبيعية والكيميائية) المرتبطة بالمادة أو المُنتج التي قد تكون مصدر قلق؟
- هل يوجد نموذج لصحيفة بيانات سلامة المواد لهذه المادة؟
- كيف يمكن أن يتعرض العاملون سلبيًا للمادة، أو منتجها في أثناء إنتاجها وصبها وعمر خدمتها؟

وفيما يلي بعض أسئلة قابلية إعادة التدوير الموصى بها التي ينبغي النظر فيها:

- ما هي تطبيقات إعادة التدوير بعد انتهاء عمر الخدمة التي يمكن توقعها من المنتج؟
- ما هي خواص المواد (الطبيعية والكيميائية) التي قد تؤثر بالسلب على البيئة في تطبيقات إعادة التدوير بعد انتهاء عمر الخدمة؟
- ما هي خواص المواد (الطبيعية والكيميائية) التي يمكن ان تؤثر بالسلب على الخواص الهندسية للمواد أو المنتجات التي يمكن إنتاجها باستخدام مواد المخلفات أو المنتجات الجانبية بعد انتهاء عمر خدمتها الأولي؟
- ما هي خواص المواد (الطبيعية والكيميائية) التي قد تؤثر بالسلب على صحة وسلامة العاملين ممن يقومون باختبار ومناولة المادة و/ أو المنتج؟

وفيما يلي بعض الأسئلة الاقتصادية الموصى بها التي ينبغي النظر فيها:

- ما هي التكلفة التي تم تفاديها للتخلص من المواد؟
- ما هي التكاليف الإضافية للتصميم والإنشاء -إن وُجدت- المرتبطة بالتطبيق المقترح؟
- ما هي تكاليف الصيانة الإضافية (أو المُخفضة) -إن وُجدت-؟
- كيف سيتأثر عمر خدمة المنتج؟
- هل ستعوض تكلفة التخلص التي تم تفاديها جميع التكاليف الأخرى؟

٨-٦-٢-٣ أوجد الاختبارات والمعايير:

٨-٦-٢-٣-١ عام:

بمجرد تحديد القضايا الفنية التي تتطلب حلًا في الخطوة (١)، يمكن حينها وضع الاختبارات والمعايير لحل هذه القضايا، وعلى الرغم من ذلك لا توجد- في الوقت الحالي- طرق اختبار ومعايير مقبولة بشكل عام لتناول جميع قضايا الهندسة والبيئة والسلامة والصحة المهنية وقابلية إعادة التدوير والتي ستبرز بشكل عام عند تقييم استخدام المواد غير التقليدية في تطبيقات الرصف.

على الرغم من عدم وجود اختبارات وطرق تقييم موحدة، فقد أُستخدِمت المواد غير التقليدية وكان أداؤها مقبولًا، وخضعت المواد التي استُخدمت وحققت أكبر قدر من النجاح -عمومًا- لاختبارات معملية وعروض توضيحية ميدانية؛ لضمان تلبية معايير الأداء المحددة للمادة والتطبيق، وفي بعض الحالات (على سبيل المثال: حبيبات خبث الأفران ورصف الأسفلت المعاد تدويره ورماد الفحم المتطاير) طورِّت طرق اختبار ومعايير خاصة بالجمعية الأمريكية لمواد الاختبار (ASTM) ووضعت معايير للاستخدام.

بالنسبة للعديد من المواد غير التقليدية المقترحة للاستخدام (أو تلك التي قد يتم اقتراحها في المستقبل)، يجب وضع اختبارات ومعايير لكل مسألة فنية.

٨-٦-٢-٣-٢ الهندسة:

أصبحت طرق الاختبار والمعايير المستخدمة نمطيًا؛ للتحقق من الملاءمة الهندسية للمواد التقليدية رسمية في مواصفات (ASTM) و (AASHTO)، وتتناول هذه المواصفات، التي تشمل -عمومًا- طرق الاختبار والمواصفات، فئات واسعة من المواد والمنتجات التي تُستخدم نمطيًا في إنشاء الرصف، بما في ذلك الركام والمواد المالئة والمواد الأسمنتية المستخدمة في الأسفلت وخرسانة الأسمنت البورتلاندي، وكذلك المواد المستخدمة في جسر الطريق والردم واستخدامات طبقة الأساس المُثبّتة (التربة -الأسمنت)، ومع ذلك، فقد وضعت طرق ومعايير اختبار (ASTM) و(AASHTO) أساسًا لتقييم المواد التقليدية، وتستند في جزء كبير منها إلى علاقات الارتباط التجريبية بين الخواص المُقاسة؛ لاختبار المواد في هذه المواد التقليدية والأداء الميداني المسجل الذي تطور على مدار عدة عقود.

وعند اقتراح استخدام مادة غير تقليدية (وعلى وجه الخصوص مخلفات أو مادة منتج جانبي) في استخدامات الرصف، وما لم تُظهر المادة المقترحة خصائص مطابقة (أو على الأقل مشابهة جدًا) لخصائص المواد التقليدية، فيمكن أن تكون قابلية تطبيق طرق اختبار ومعايير (ASTM) أو (AASHTO) موضع تساؤل، ويمكن أن يلزم إجراء تعديلات على طرق الاختبار أو وضع طرق اختبار جديدة.

يوصى بمراعاة قضايا الاختبارات الهندسية التالية كجزء من عملية التقييم الهندسي:

- ضع قائمة بالاختبارات القياسية التي يمكن استخدامها لتقييم المواد، واختيار المعايير المقبولة.
- حدد طرق الاختبار المعدلة أو طرق اختبار الأداء المعدلة التي يمكن أن تكون قابلة للتطبيق، والمعايير المستهدفة للمساعدة في تطوير متطلبات التصميم.
- انظر في الحاجة إلى تعزيز الاختبارات المعملية بتقييمات ميدانية لاحقة.

٨-٦-٢-٣-٣ القضايا البيئية:

بوجه عام، ينبغي مراعاة قضايا التقييم البيئي التالية:

- حدد معايير التقييم لوضع الحد الأقصى لمستوى التلوث المقبول في المادة والمنتج.
- حدد معايير وضع الحد الأقصى المقبول لانبعاثات المكونات الطبيعية والكيميائية (الانبعاثات أو الترشيح) من المادة والمنتج.
- حدد طرق الاختبار والتقييم المعملية التي يمكن استخدامها؛ لتحديد كمية الحد الأقصى لمستويات التلوث والانبعاثات المحتملة.

٨-٦-٢-٣-٤ الصحة والسلامة المهنية:

تعد احتمالية التعرض للغبار والأبخرة والحواف الحادة والسوائل المسببة للتآكل وما إلى ذلك قضايا يجب مراعاتها عند تقييم المخلفات أو مواد المنتجات الجانبية. لتقييم قضايا السلامة والصحة المهنية بشكل ملائم، يوصى بمراعاة قضايا السلامة والصحة المهنية التالية:

- ضع الاختبارات المعملية أو الميدانية التي يمكن أن تكون ضرورية؛ لوصف أفضل للغبار والأبخرة الغازية وخواص المواد (مثل: الحواف الحادة) والسوائل المسببة للتآكل التي قد تنتج عن إدراج المادة في التطبيقات المقترحة.
- حدد المعايير التي ستُعدّ مقبولة فيما يتعلق بالمخاوف على صحة وسلامة العاملين.

٨-٦-٢-٣-٥ قابلية إعادة التدوير:

عند إدخال مواد جديدة في الرصفيات، يجب النظر في إمكانية إعادة التدوير المحتملة للمادة أو المنتج في نهاية عمر خدمتها الوظيفي، وقد تصبح المادة أو المنتج الأصلي، في ذلك الوقت، مادة خام جديدة أو ربما مكونًا لمنتج جديد.

من وجهة نظر هندسية، يقتضي تقييم إمكانية إعادة التدوير المحتملة أن يقتنع المصمم بنفسه بأنه لا توجد اعتبارات ملحوظة للخواص الهندسية من شأنها أن تمنع الاستخدام المستقبلي للمادة أو المنتج الذي يحتوي على مخلفات أو مادة منتج جانبي أو إعادة تدويرها. وعلى غرار ذلك، ومن وجهة نظر السلامة والصحة البيئية أو المهنية، من الضروري التأكد من أن إعادة تدوير الرصف لن يؤدي إلى أي تأثير سلبي على البيئة.

ويوصى بمراعاة قضايا قابلية إعادة التدوير التالية:

- ضع اختبارات معملية أو ميدانية أو طرق تقييم -إذا لزم الأمر- والتي يمكن استخدامها لتحديد ما إذا كانت إعادة تدوير المواد ستؤدي إلى تأثيرات هندسية سلبية.
- ضع اختبارات معملية أو ميدانية أو طرق تقييم -إذا لزم الأمر- والتي يمكن استخدامها لتحديد ما إذا كانت إعادة تدوير المواد ستؤدي إلى تأثيرات بيئية سلبية.
- ضع اختبارات معملية أو ميدانية أو طرق تقييم -إذا لزم الأمر- والتي يمكن استخدامها لتحديد ما إذا كانت إعادة تدوير المواد ستؤدي إلى تأثيرات سلبية على الصحة والسلامة المهنية.

٨-٦-٢-٤ إجراء الاختبارات:

تتمثل الخطوة الثالثة في عملية التقييم في تنفيذ طرق الاختبار والتقييم لتحديد ما إذا كانت المادة تلبي المعايير الموضوعة.

٨-٦-٢-٥ التعديل في المادة أو المنتج:

إذا كانت المادة غير قادرة على تلبية المعايير المحددة للمادة أو المنتج، فمن المفيد النظر فيما إذا كانت المعالجة الإضافية أو البديلة للمادة أو تعديل المنتج قد تحقق النتائج المرجوة.

على سبيل المثال: إذا كانت أي مخلفات أو مادة منتج جانبي تحتوي على جزء أكبر من الجسيمات الدقيقة الحبيبات أكثر مما هو مرغوب فيه للاستخدام كركام بديل (أن المادة غير قادرة على تلبية المواصفات المستهدفة)، يمكن الاستعانة بالغربلة أو الخلط مع مادة خشنة لتعديل تدرج المنتج المركب ليمتثل للمواصفات المطلوبة، وبدلاً من ذلك، قد يكون تصميم المنتج المعدل (على سبيل المثال: تصميم الخلطة) قادرًا على التعويض عن نعومة المادة.

٨-٦-٢-٦ عوامل التنفيذ:

حتى إذا كان من الممكن تلبية جميع قضايا الهندسة والبيئة والسلامة والصحة المهنية وقابلية إعادة التدوير والقضايا الاقتصادية المرتبطة باستخدام مادة غير تقليدية في تطبيقات الرصف؛ فإنه ستظل هناك بعض القضايا غير الملموسة وغير الفنية التي قد تمنع التنفيذ على مدى واسع، وتُجمَع هذه القضايا غير الفنية تحت فئة عوامل التنفيذ، وتشمل عوامل التنفيذ القبول المؤسسي والقبول السياسي وقبول العامة.

٨-٦-٢-٦-١ القبول المؤسسي:

يراعي عامل القبول المؤسسي جميع الخطوات المطلوبة للحصول على الموافقة على المادة، ويشمل ذلك الاختبار الأولي والعرض التوضيحي للتطبيقات تطوير مواصفات لاستخدام المواد ودرجة استعداد المهندسين لقبول وتوصيف المواد (إذا لم يكونوا مكلفين بذلك).

استنادًا إلى المادة المحددة والاستخدام المقترح لها، ينبغي النظر في طول الوقت المطلوب في مثل هذه العملية ودرجة قبول المادة في قرار المضي قدمًا في التطبيق المقترح. على سبيل المثال: فإن اقتراح استخدام مادة يحتمل أن تكون تفاعلية كركام في خرسانة الأسمنت البورتلاندي سوف يقتضي- في معظم الحالات- إجراء اختبار ميداني طويل الأمد لتحديد مدى ملاءمة التطبيقات ويمكن أن يؤدي في النهاية إلى الإحجام عن استخدام المادة إذا لم تكن بيانات العرض التوضيحي قاطعة، ويمكن أن تتطلب المواد ذات الخصائص البيئية الهامشية عملية تقييم شاملة للمخاطر الصحية، والتي يمكن ان تتطلب استثمارًا للوقت والمال بما يمكن ألا يتناسب مع المزايا المرتبطة بإعادة تدوير المواد، وقد تجعل العديد من المهندسين مترددين في استخدام المواد في نهاية العملية.

٨-٦-٢-٦-٢ القبول السياسي:

يشمل القبول السياسي مستوى الدعم المتوقع من المسؤولين الحكوميين للاستخدام المقترح، ويمكن أن يكون هذا الدعم مرتبطًا بشكل مباشر بالمزايا المتصورة للعامة إذا ما نُفّذت استراتيجية استخدام المواد المقترحة. على سبيل المثال: يمكن توقع دعم سياسي أكبر لمقترح استخدام الإطارات الخردة (مادة مخلفات ظاهرة للعيان) في استخدامات إنشاء الرصف أكثر من منتجات المحاجر الجانبية، كما يمكن توقع تحويل هذا الدعم السياسي إلى مزايا مؤسسية، لا سيما فيما يتعلق بالجدول الزمني للعرض التوضيحي وتطوير المواصفات.

٨-٦-٢-٦-٣ قبول العامة:

يجب مراعاة عامل قبول العامة في أي عملية، ويمكن توقع رد الفعل السلبي للعامة على استراتيجية تطبيقات المواد المقترحة في العديد من الحالات، مما يؤدي في نهاية المطاف إلى تآكل الدعم السياسي والمؤسسي، وفي بعض الأحيان، يمكن أن يكون من الحكمة اختيار التطبيقات التي ينظر إليها العامة بشكل أفضل، حتى لو أنها من الناحية الفنية يمكن أن تكون متساوية أو أكثر ملاءمة في التطبيقات الأخرى، على سبيل المثال: يمكن أن يكون استخدام مخلفات أو مادة منتج جانبي في الطبقة السطحية لمسار المرور أمرًا مجديًا من الناحية الفنية، ولكن يمكن أن يكون من المستحسن اقتراح استخدامها في طبقة أساس لتوفير طبقة واقية فوق الرصف المعدل للمنتج الجانبي، أو استخدامها في أكتاف الطريق بدلاً من المسارات المرورية لتقليل أي مخاوف يمكن أن يتوقعها العامة.

٨-٦-٢-٧ العرض التوضيحي الميداني:

تُجرى العروض التوضيحية عادةً لحل القضايا الفنية (الهندسة والبيئة والسلامة والصحة المهنية وقابلية إعادة التدوير) التي لا يمكن تناولها بالكامل في بيئة معملية، كما يمكن إجراؤها لتناول عوامل التنفيذ من خلال توفير البيانات الميدانية؛ لطمأنة العامة بأن التطبيق المقترح لن يؤدي إلى مشكلات سلبية على سلامة الطرق أو مشكلات بيئية، حتى إذا كانت البيانات المعملية توحي بأن الحال كذلك، ويعد التخطيط السليم أمرًا حاسمًا لتنفيذ عرض توضيحي ناجح لضمان توافر جميع معدات المراقبة والإنشاء وإجراءات مراقبة الجودة.

٩- تصميم تأهيل الرصفيات:

٩-١ الطريقة:

تعرَّف إعادة التأهيل بأنها (تدابير لتحسين أو تقوية أو إنقاذ الرصفيات القائمة المعيبة؛ بحيث تستمر في الخدمة مع صيانة روتينية فقط. وتُظهِر الرصفيات المعيبة عيوبًا تتخطى ما يمكن معالجته بالصيانة الروتينية). وبمعنى آخر، رغم أن الصيانة من شأنها إبطاء معدل تدهور الرصف، إلا أنه يستحيل أن توقفه. ولذلك، لابد في نهاية المطاف معالجة آثار التدهور والقضاء عليها بإضافة أو استبدال المواد في بُنية الرصف القائم. وهذا هو ما يسمى إعادة التأهيل. تعتمد خيارات إعادة التأهيل على الظروف المحلية وأنواع عيوب الرصف. يتضمن هذا الجزء إرشادات لتصميم طبقة التكسية (overlay) الإنشائي (من حيث طبقة التكسية من خلطة الأسفلت الساخن) بهدف زيادة القدرة الإنشائية للرصف.

وترد استراتيجيات صيانة وإعادة تأهيل الرصف الأخرى في الجزء (٦-٢) من كود الطرق السعودي ٥٠١ (نظم إدارة صيانة الرصف).

٩-٢ تقييم الرصف:

يرد وصف تقييم الرصف في الجزء (٥-٢) من كود الطرق السعودي ٥٠١ (نظم إدارة صيانة الرصف).

٩-٣ طرق إعادة التأهيل:

أشير إلى طرق إعادة التأهيل في الباب (٦) من كود الطرق السعودي ٥٠١ (نظم إدارة صيانة الرصف).

٩-٤ تقييم الرصف القائم:

أشير إلى تقييم الرصف القائم في الباب (٥) من كود الطرق السعودي ٥٠١ (نظم إدارة صيانة الرصف).

٩-٥ عملية تصميم إعادة التأهيل التجريبي للرصفيات المرنة:

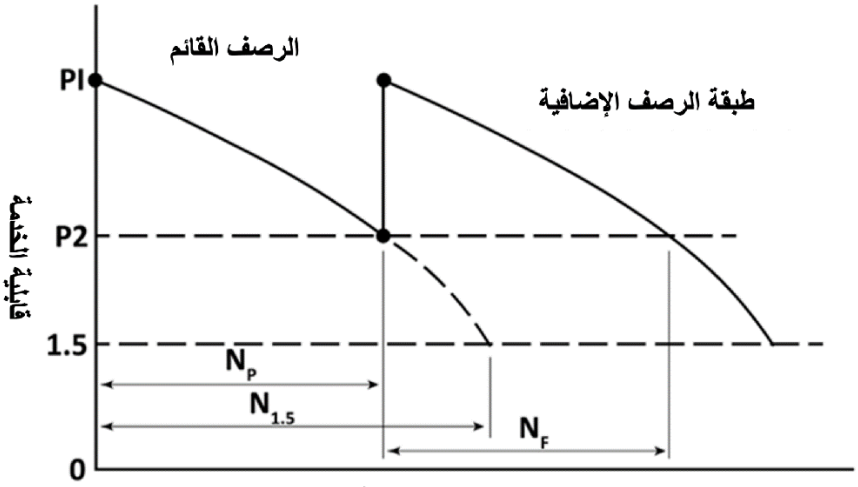
٩-٥-١ المبادئ الأساسية:

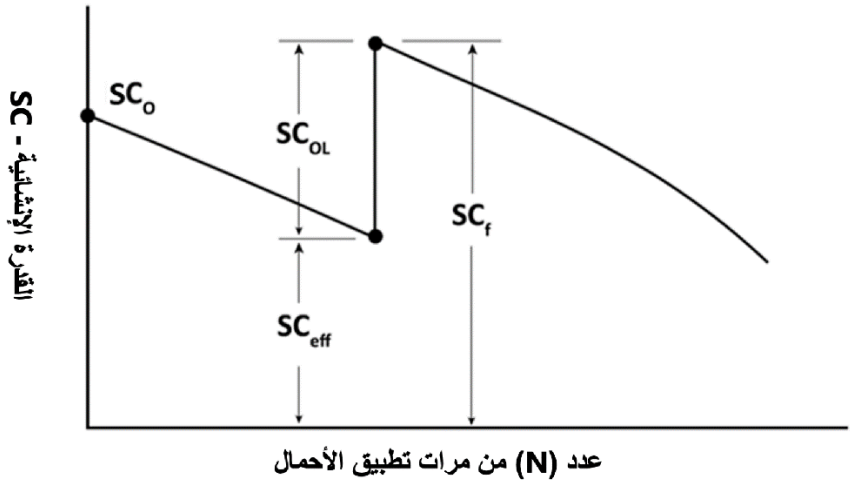
تتوافق طرق تصميم طبقة التكسية (overlay) الواردة هنا مع ما تضمنته طريقة (AASHTO) لتصميم إعادة التأهيل، وهي مبنية على المفهوم الذي مفاده أن الوقت وأحمال المرور تُقلل قدرة الرصف على حمل الأحمال، وبالتالي يمكن تصميم طبقة تكسية بهدف زيادة قدرة الرصف على حمل الأحمال خلال فترة تصميمة مستقبلية.

يوضح (٩-١) المفاهيم العامة للعجز الإنشائي والقدرة الإنشائية الفعالة. يُرمز للقدرة الإنشائية للرصف حينما يكون جديدًا بالرمز (SC_o). بالنسبة للرصفيات المرنة، القدرة الإنشائية هي الرقم الإنشائي (SN).

وتتناقص القدرة الإنشائية للرصف عبر الوقت ومع حركة المرور. بحلول توقيت إجراء تقييم لتصميم طبقة التكسية، تكون القدرة الإنشائية للرصف قد انخفضت وصولاً إلى القدرة الإنشائية الفعالة (SC_{eff}). ويُعبَّر عن القدرة الإنشائية الفعالة للرصف المرن بالرمز (SN_{eff}).

إذا كانت القدرة الإنشائية النهائية للرصف، SC_f (SN_f)، مطلوبة لاستيعاب المرور المستقبلي المتوقع خلال فترة تصميم طبقة التكسية ، فعندئذٍ يلزم إضافة طبقة تكسية تكون قدرتها الإنشائية هي SC_{oL}، أي ($SC_{oL} = SC_f - SC_{eff}$).





الشكل (٩–١) فقدان القدرة الإنشائية عبر الوقت ومع حركة المرور (AASHTO, 1993).

٩-٥-٢ تصميم السماكة لطبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية:

في حال وضع طبقة تكسية لغرض التحسين الإنشائي؛ فإن السماكة المطلوبة لطبقة التكسية تكون عبارة عن دالة في القدرة الإنشائية المطلوبة لتلبية الطلب المروري المستقبلي وكذلك القدرة الإنشائية للرصف القائم. تُحدد السماكة المطلوبة لزيادة القدرة الإنشائية بهدف تحمل المرور المستقبلي من خلال المعادلة التالية:

المعادلة (٩-١)

$$SN_{ol} = a_{ol} \times D_{ol} = SN_f - SN_{eff}$$

حيث:

SN_{ol} = الرقم الإنشائي المطلوب لطبقة التكسية.

a_{ol} = المعامل الإنشائي لطبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية.

D_{ol} = السماكة المطلوبة لطبقة التكسية، بوصة.

SN_f = الرقم الإنشائي المطلوب لتحمل حركة المرور في المستقبل.

SN_{eff} = الرقم الإنشائي الفعال للرصف القائم.

يعد المعامل الإنشائي لطبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية (a_{ol}) مساويًا للقيمة ٠,٤٤.

٩-٥-٣ تحديد الرقم الإنشائي (SN_f):

لتحديد الرقم الإنشائي المطلوب لتحمل حركة المرور في المستقبل (SN_f)، يُستخدم الرسم البياني (nomograph) في الشكل (٥-٨). تؤخذ المعلمات التالية بعين الاعتبار:

- الموثوقية (R)، ٪ (الجزء الفرعي ٥-٢-٥).
- الانحراف المعياري الكلي (S_o) (الجزء الفرعي ٥-٢-٥).
- إجمالي مكافئات تطبيق الحمل المروري المحوري المفرد بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل) (w_{18}) (الجزء الفرعي ٥-٢-٤).
- الفاقد في قابلية الخدمة (ΔPSI) (الجزء الفرعي ٥-٢-٢).
- معامل مرونة التصميم الفعال للقاعدة الترابية (M_R).

سيُحدَّد معامل مرونة التصميم الفعال للقاعدة الترابية (M_R) عن طريق الحساب العكسي من بيانات الانحراف. ويجب أن يكون معامل مرونة التصميم الفعال للقاعدة الترابية مُمثِّلاً في كل حالة لتأثيرات التغيرات الموسمية ومتسقًا مع قيمة معامل المرونة المستخدمة؛ لتمثيل تربة طريق اختبار (AASHTO). ويمكن اتباع الإجراءات الموضحة في الجزء الفرعي (٥-٣-٧) لإجراء تعديل موسمي إذا اقتضت الضرورة ذلك. كما يلزم تعديل قيم معامل مرونة التصميم الفعال للقاعدة الترابية (M_R) المحسوبة تراجعيًا من الانحرافات بحيث تتوافق مع القيم المعملية المُقاسة والتي استُخدِمت في تربة طريق اختبار (AASHTO) عند تطوير معادلة تصميم الرصف المرن. ويوصى بضرب قيم (MR) المحسوبة عكسيًا في عامل تصحيح (C) قدره (0.33) لاستخدامها في تحديد الرقم الإنشائي المطلوب لتحمل حركة المرور في المستقبل (SN_f) لأغراض التصميم عند استخدام حمل مقياس انحراف الثقل الساقط (FWD) يبلغ حوالي ٤,٠٠٠ كجم. وينبغي استخدام (M_R) التصميمية التالية لتحديد الرقم الإنشائي المطلوب لتحمل حركة المرور في المستقبل (SN_f):

المعادلة (٩-٢)

$$\boldsymbol{design\ M_R = C \times \left(\frac{0.24 \times P}{d_r \times r}\right)}$$

حيث:

C = 0.33.

P = حمل مقياس انحراف الثقل الساقط (FWD) (رطل).

d_r = الانحراف (بالبوصة) المقاس عند مسافة (r).

r = المسافة من مركز الحمل (بوصة).

لا يلزم تعديل درجة الحرارة عند تحديد (M_R)؛ نظرًا لأن الانحراف المستخدم ناتج فقط عن تشوه القاعدة الترابية.

ويلزم قياس الانحراف المستخدم في عملية الحساب العكسي لمعامل القاعدة الترابية بشكل كافٍ بحيث ينتج عنه تقدير جيد لمعامل القاعدة الترابية، وذلك بشكل مستقل عن تأثيرات أي طبقات فوقها، ولكن -أيضًا- يكون قريبًا بدرجة كافية بحيث لا تتضاءل قيمته للغاية مما قد يجعل من الصعب قياسه بدقة. ويمكن تحديد الحد الأدنى للمسافة من خلال العلاقة التالية:

المعادلة (٩-٣)

$$\boldsymbol{r \geq 0.7 \times a_e}$$

حيث:

المعادلة (٩-٤)

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(D \times \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}}\right)^2\right]}$$

حيث:

a_e = نصف قطر كنتور الإجهاد عند السطح البيني للرصف والقاعدة الترابية، بوصة.

a = نصف قطر لوح تحميل الاختبار غير الائتلافي، بوصة.

D = إجمالي السماكة لطبقات الرصف فوق القاعدة الترابية، بوصة.

E_p = المعامل الفعال لجميع طبقات الرصف فوق القاعدة الترابية، رطل لكل بوصة مربعة (القسم الفرعي ٩-٥-٤-٢).

٩-٥-٤ تحديد الرقم الإنشائي (SN_{eff}):

توجد ثلاث طرق لتحديد الرقم الإنشائي الفعال لرصف الخرسانة الأسمنتية القائم وهي:

١- المسح البصري واختبار المواد. وهذا يتضمن تقييم الظروف الراهنة استنادًا إلى مسوحات العيوب والصرف، وعادةً بعض مواد الاختبار والعينات الاسطوانية (coring).
٢- اختبار الانحراف غير الإتلافي (NDT). وهو عبارة عن تقييم مباشر للقاعدة الترابية في الموقع وصلابة الرصف على امتداد المشروع.
٣- العمر المتبقي (تلف الكلل الناتج عن المرور). تُستخدم المعرفة بالمرور السابق لتقييم تلف الكلل الحالي في الرصف. ويمكن بعدئذٍ تقدير العمر المستقبلي المتبقي للرصف. علمًا بأن طريقة العمر المتبقي تكون أكثر قابلية للتطبيق على الرصفيات ذات التدهور البسيط المرئي.

ويُقترح استخدام جميع الطرق الثلاث لتقييم الرصف ثم تحديد قيمة الرقم الإنشائي الفعال للرصف القائم (SN_{eff}) استنادًا إلى النتائج، وذلك باستخدام الحكم الهندسي.

٩-٥-٤-١ القدرة الإنشائية المبنية على المسح البصري واختبارات المواد:

ينبغي أن تبدأ الملاحظة باستعراض جميع المعلومات المتاحة فيما يتعلق بتصميم وتنفيذ الرصف وتواريخ صيانته. كما ينبغي أن يستتبع ذلك بمسح تفصيلي لتحديد نوع العيوب السطحية وشدتها ومواقعها وتُسرد أدناه بعض أنواع العيوب الرئيسة التي تشير إلى قصور إنشائي. وبعضها لا يتسبب التحميل في حدوثها -ابتداءً-، غير أن التعرض للأحمال يزيد من شدتها وبالتالي يُقلل من القدرة على حمل الحمولة.

- كلل أو تشقق التمساحي في مسارات العجلات. ولمنع تكرار حدوث هذا العيب يلزم إجراء ترقيعات سطحية وطبقة تكسية إنشائية.
- تخدد في مسارات العجلات.
- شقوق عرضية أو طولية تتطور لاحقًا إلى حفر.
- مناطق انهيار موضعية حيث تتفكك الطبقات الأساسية، مما يتسبب في انهيار الطبقة السطحية للخرسانة الأسمنتية (على سبيل المثال: انهيار القص الرئيس في طبقة الأساس/القاعدة الترابية، وتعرّي طبقة أساس الخرسانة الأسمنتية).

إضافةً إلى مسح عيوب السطح، ينصح أيضًا بتطبيق برنامج الاختبار وأخذ العينات الاسطوانية للتحقق من العيوب السطحية المرصودة أو تحديد سبب حدوثها. كما ينبغي اختيار مواقع أخذ العينات الاسطوانية عقب إجراء مسح العيوب؛ لضمان أنها تُمثِّل جميع الأحوال المهمة والجوهرية للرصف. في حالة استخدام اختبار *الانحراف* غير الإتلافي، فعندئذٍ ينبغي كذلك استخدام البيانات المستمدة من هذا الاختبار للمساعدة على اختيار المواقع المناسبة لأخذ العينات.

ويتمثل الهدف من أخذ العينات في تحديد سماكة المادة وظروفها. وسيُكتسب قدر كبير من المعلومات -ببساطة- عن طريق الفحص البصري لمواد العينات المأخوذة من الجسّات الأرضية. غير أنه ينبغي مراعاة أن عملية أخذ العينات الاسطوانية تسبب اضطرابًا في المادة؛ لاسيما على امتداد الوجه المقطوع لمادة الخرسانة الأسمنتية. على سبيل المثال: من المعلوم في بعض الحالات أن أخذ العينات يطمس الأدلة على وجود تعري. وبالتالي ينبغي على أقل تقدير فصل وتجنيب بعض العينات الاسطوانية الإسفلتية الأسفلتية عن لفحصها بحثًا عن عوامل تعري.

وتنطوي طريقة مسح الحالة لتحديد الرقم الإنشائي الفعال على تحليل المكون باستخدام معادلة الرقم الإنشائي:

$$SN_{eff} = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3$$ **المعادلة (٩-٥)**

حيث:

D_1 و D_2 و D_3 = سماكة الطبقة السطحية، وطبقة الأساس، وطبقة ما تحت الأساس للرصف القائم، على التوالي.

a_1 و a_2 و a_3 = معاملات الطبقات الإنشائية المقابلة.

m_2 و m_3 = معامل الصرف لطبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس الحبيبية، على التوالي (الجدول ٥-١١).

استنادًا إلى أنواع التدهور الحالي ومقدارها، ينبغي في معظم الحالات أن تكون قيم معامل الطبقة المخصصة للمواد في الرصف قيد الخدمة أقل من القيم التي ستخصص لنفس المواد في الرصف الجديد. ولعل الاستثناء من هذه القاعدة العامة ينطبق على المواد الحبيبية غير المترابطة التي لا تظهر عليها أي علامة تدهور أو تلوث. ويعرض الجدول (٩-١) بعض معاملات الطبقة المقترحة للمواد القائمة.

الجدول (٩–١) جدول معاملات الطبقة المقترحة لمواد طبقات رصف الخرسانة الأسفلتية القائمة (AASHTO, 1993).

المادة	حالة الطبقة السطحية	المعامل
طبقة سطحية من الخرسانة الأسفلتية	تشققات تمساحية قليلة أو منعدمة و/أو مجرد شقوق مستعرضة منخفضة الشدة.	٠,٣٥ - ٠,٤٠
	أقل من ١٠ ٪ تشققات تمساحية منخفضة الشدة و/أو أقل من ٥ ٪ شقوق مستعرضة متوسطة وعالية الشدة.	٠,٢٥ - ٠,٣٥
	أكبر من ١٠ ٪ تشققات تمساحية منخفضة الشدة و/أو أقل من ١٠ ٪ تشققات تمساحية متوسطة الشدة و/أو أكبر من ٥ ٪ - ١٠ ٪ شقوق مستعرضة متوسطة وعالية الشدة.	٠,٢٠ - ٠,٣٠
	أكبر من ١٠ ٪ تشققات تمساحية متوسطة الشدة و/أو أقل من ١٠ ٪ تشققات تمساحية عالية الشدة و/أو أكبر من ١٠ ٪ شقوق مستعرضة متوسطة وعالية الشدة.	٠,١٤ – ٠,٢٠
	أكبر من ١٠ ٪ تشققات تمساحية عالية الشدة و/أو أكبر من ١٠ ٪ شقوق مستعرضة عالية الشدة.	٠,٠٨ - ٠,١٥
طبقة أساس مُثبّتة	تشققات تمساحية قليلة أو منعدمة و/أو مجرد شقوق مستعرضة منخفضة الشدة.	٠,٢٠ - ٠,٣٥
	أقل من ١٠ ٪ تشققات تمساحية منخفضة الشدة و/أو أقل من ٥ ٪ شقوق مستعرضة متوسطة وعالية الشدة.	٠,١٥ - ٠,٢٥
	أكبر من ١٠ ٪ تشققات تمساحية منخفضة الشدة و/أو أقل من ١٠ ٪ تشققات تمساحية متوسطة الشدة و/أو أكبر من ٥ ٪ - ١٠ ٪ شقوق مستعرضة متوسطة وعالية الشدة.	٠,١٥ - ٠,٢٠
	أكبر من ١٠ ٪ تشققات تمساحية متوسطة الشدة و/أو أقل من ١٠ ٪ تشققات تمساحية عالية الشدة و/أو أكبر من ١٠ ٪ شقوق مستعرضة متوسطة وعالية الشدة.	٠,١٠ - ٠,٢٠
	أكبر من ١٠ ٪ تشققات تمساحية عالية الشدة و/أو أكبر من ١٠ ٪ شقوق مستعرضة عالية الشدة.	٠,٠٨ - ٠,١٥
طبقة أساس/ما تحت الأساس حبيبية	لا يظهر أي دليل على وجود ضخ أو تحلل أو تلوث بالركام الناعم.	٠,١٠ - ٠,١٤
	ثمة دليل على وجود ضخ أو تحلل أو تلوث بالركام الناعم.	٠,٠٠ - ٠,١٠

٢-٤-٥-٩ القدرة الإنشائية المبنية على اختبار الانحراف غير الإتلافي (NDT):

يؤدي اختبار الانحراف غير الإتلافي وظيفتين هما: (١) لتقدير معامل مرونة القاعدة الترابية و (٢) توفير تقدير مباشر للرقم الإنشائي الفعال للرصف القائم (SN_{eff}). وإضافةً إلى التقييم الإنشائي، يمكن أن يوفر اختبار الانحراف غير الإتلافي بيانات أخرى مفيدة لعملية التصميم؛ حيث يمكن استخدام بيانات الانحراف للتقدير الكمي للتباين على امتداد المشروع وتقسيمه إلى أجزاء ذات قوة إنشائية مماثلة.

كما أن طريقة اختبار الانحراف غير الإتلافي؛ لتحديد الرقم الإنشائي الفعال للرصف القائم تفترض افتراضًا مفاده أن القدرة الإنشائية للرصف عبارة عن دالة في سماكته الكلية وصلابته الإجمالية. والعلاقة بين الرقم الإنشائي الفعال للرصف القائم والسماكة والصلابة هي كالتالي:

المعادلة (٩-٦)

$$SN_{eff} = 0.0045 \times D \times \sqrt[3]{E_p}$$

حيث:

D = إجمالي السماكة لجميع طبقات الرصف فوق القاعدة الترابية، بوصة.

E_p = المعامل الفعال لطبقات الرصف فوق القاعدة الترابية، رطل لكل بوصة مربعة.

ويمكن أن تحسب قيمة (E_p) عكسيًا من بيانات الانحراف. إذا كان معامل مرونة القاعدة الترابية والسماكة الإجمالية لجميع الطبقات فوق القاعدة الترابية معلومين أو مُفترضين، فعندئذٍ يمكن تحديد المعامل الفعال للهيكل الإنشائي للرصف بأكمله (جميع طبقات الرصف فوق القاعدة الترابية) من الانحراف المُقاس في مركز لوح التحميل، وذلك باستخدام المعادلة التالية:

المعادلة (٩-٧)

$$d_0 = 1.5 \times p \times a \times \left\{ \frac{1}{M_R \times \sqrt{1+\left(\frac{D}{a} \times \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}}\right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{D}{a}\right)^2}}\right]}{E_p} \right\}$$

حيث:

d_o = الانحراف المُقاس عند مركز لوح التحميل (والمُعدل عند درجة حرارة قياسية تبلغ ٢٠ درجة مئوية (٦٨ درجة فهرنهايت)، بوصة.

p = ضغط لوح تحميل اختبار الانحراف غير الائتلافي، رطل لكل بوصة مربعة.

a = نصف قطر لوح تحميل اختبار الانحراف غير الائتلافي، بوصة.

D = إجمالي السماكة لطبقات الرصف فوق القاعدة الترابية، بوصة.

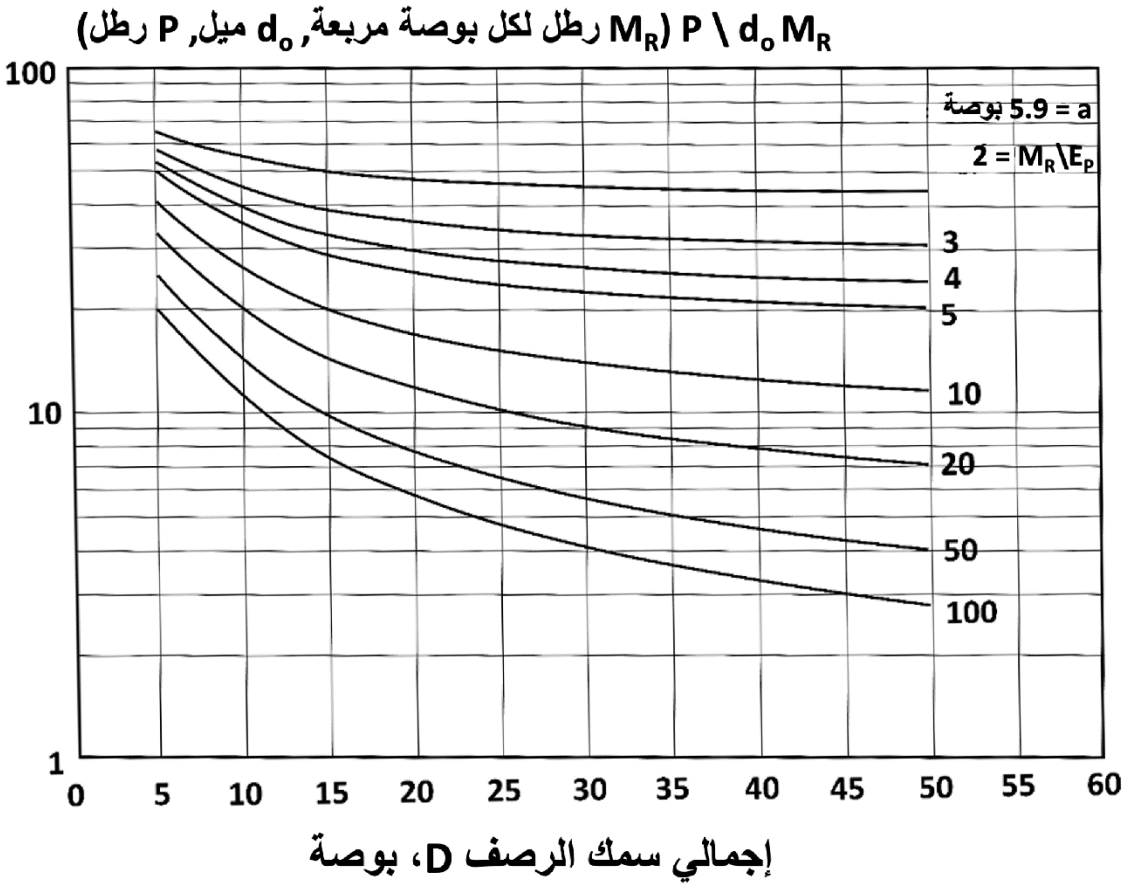
M_R= معامل المرونة للقاعدة الترابية، رطل لكل بوصة مربعة.

E_p = المعامل الفعال لجميع طبقات الرصف فوق القاعدة الترابية، رطل لكل بوصة مربعة.

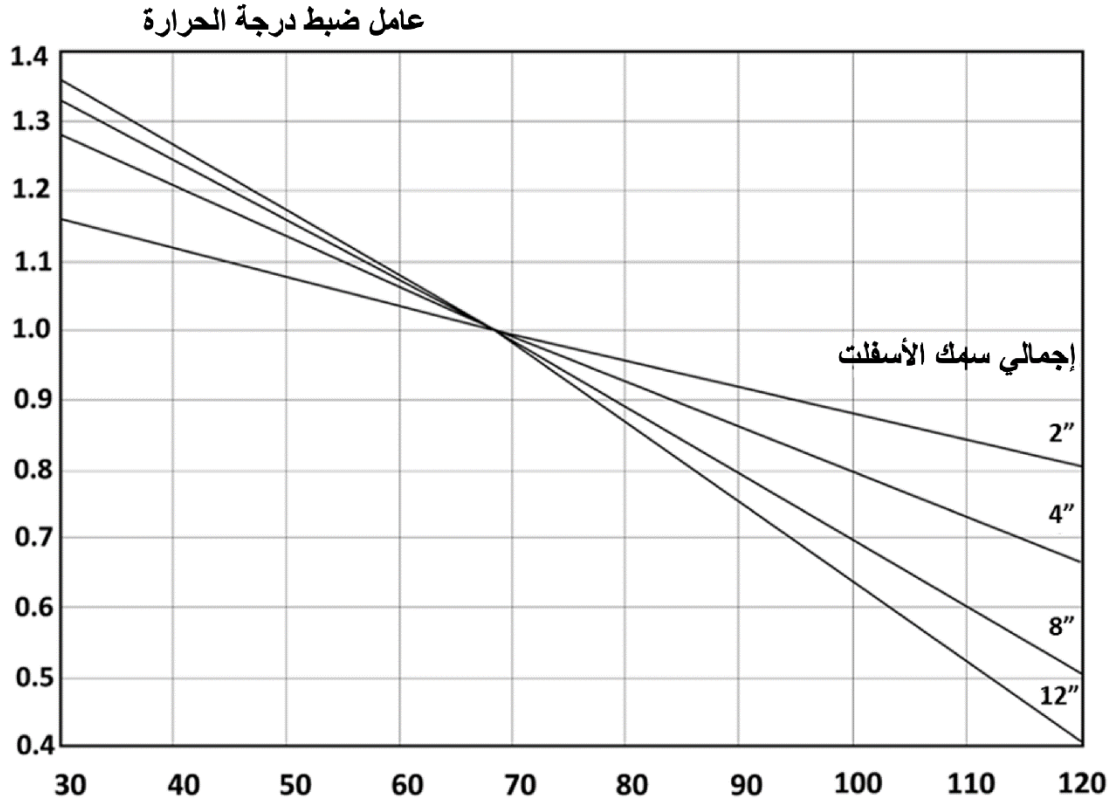
بالنسبة لنصف قطر لوح تحميل يبلغ ١٥٠ مم (٥,٩ بوصة)، يمكن استخدام الشكل (٩-٢) لتحديد النسبة (E_p/M_R)، وبعدئذٍ يمكن تحديد المعامل الفعال لطبقات الرصف فوق القاعدة الترابية (E_p) لقيمة معلومة أو مُفترضة من معامل المرونة للقاعدة الترابية (M_R).

ولأغراض مقارنة المعامل الفعال لطبقات الرصف فوق القاعدة الترابية (E_p) على طول امتداد المشروع، ينبغي تعديل قيم الانحراف المقاس عند مركز لوح التحميل (d_o) والمستخدمة لتحديد المعامل الفعال لطبقات الرصف فوق القاعدة الترابية (E_p) وضبطها عند درجة حرارة مرجعية واحدة. وعلاوةً على ذلك، إذا كان من المقرر تحديد الرقم الإنشائي الفعال للرصف القائم في الخطوة ٧ باستخدام قيم (E_p) المحسوبة عكسيًا من بيانات الانحراف، فعندئذٍ ينبغي أن تكون درجة الحرارة المرجعية للضبط هي ٢٠ درجة مئوية (٦٨ درجة فهرنهايت)، بحيث تصبح متوافقة مع الطريقة الخاصة برصف الخرسانة الأسفلتية الجديد والموضحة في الجزء (٥-٢). ويمكن استخدام الشكل (٩-٣) لضبط قيمة الانحراف المُقاس عند مركز لوح التحميل (d_o) لرصفيات الخرسانة الأسفلتية ذات طبقات الأساس الحبيبية أو المعالجة بالأسفلت. كما يمكن استخدام (الشكل ٩-٤) لضبط قيمة الانحراف المُقاس عند مركز لوح التحميل (d_o) لرصفيات الخرسانة الأسفلتية ذات طبقات الأساس المُثبّتة بالأسمنت والبوزولان .

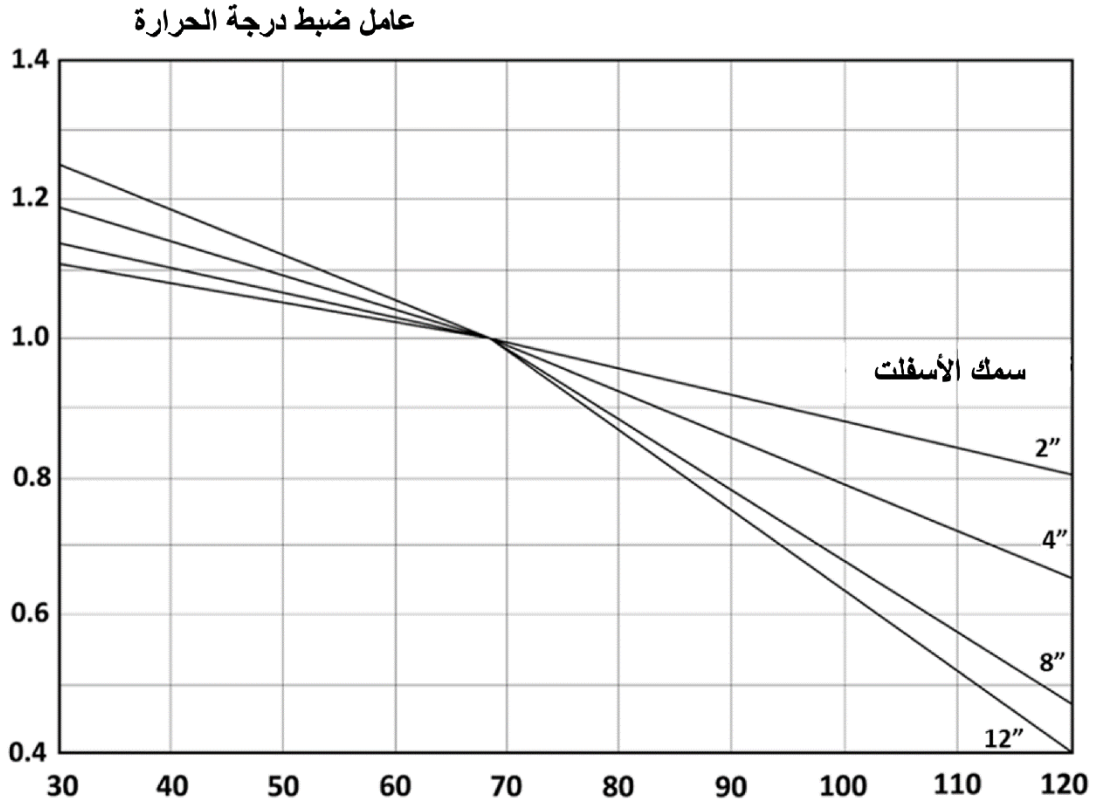
ويمكن كذلك استخدام (الشكل ٩-٥) لتحديد الرقم الإنشائي الفعال (SN_{eff}) بتطبيق المعادلة (٩-٦).



الشكل (٩–٢) تحديد النسبة (EP/MR) (AASHTO, 1993).

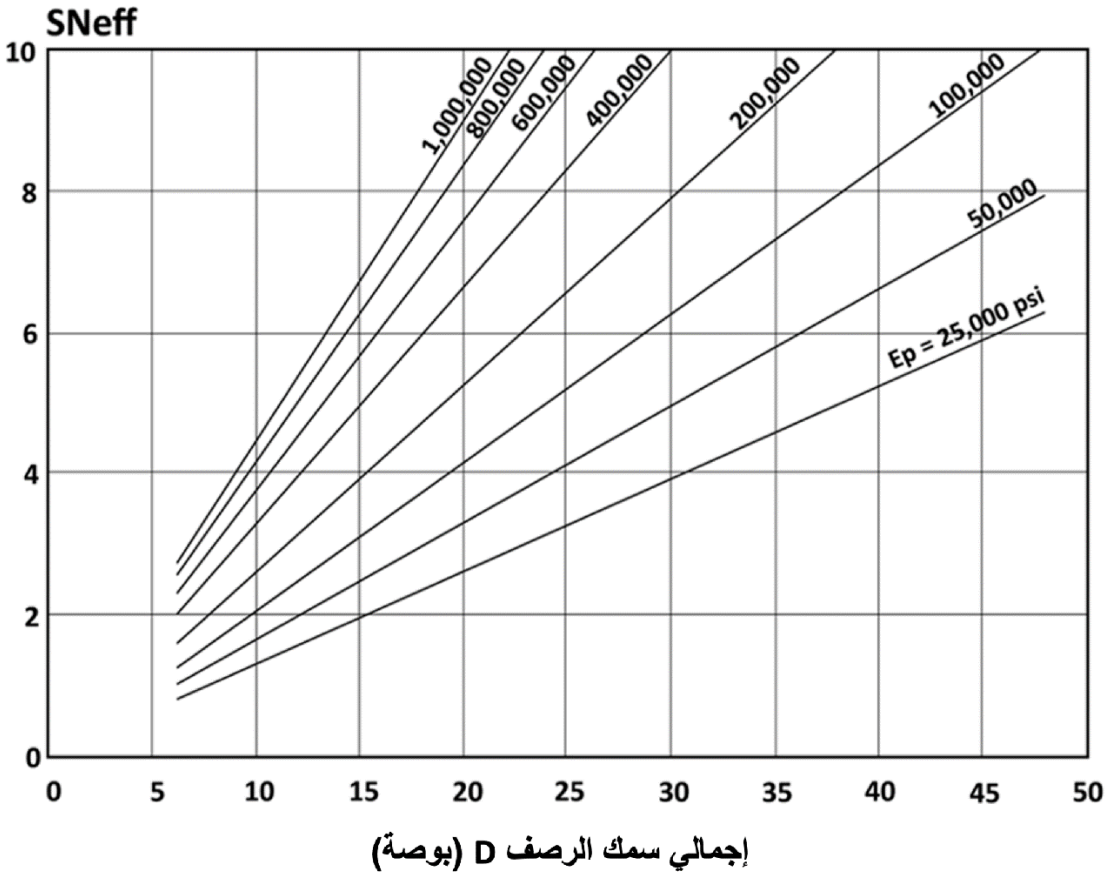


الشكل (٩–٣) التعديل إلى قيمة الانحراف المقاس عند مركز لوح التحميل (d_o) لدرجة حرارة خلطة الخرسانة الأسفلتية للرصفيات ذات طبقات الأساس الحبيبية أو المعالجة بالأسفلت (AASHTO, 1993).



درجة حرارة خلطة الخرسانية الأسفلتية، درجة فهرنهايت

الشكل (٩–٤) التعديل إلى قيمة الانحراف المقاس عند مركز لوح التحميل (d_o) لدرجة حرارة خلطة الخرسانة الأسفلتية للرصفيات ذات طبقات الأساس المعالجة بالأسمنت أو البوزولان (AASHTO, 1993).



الشكل (٩–٥) الرقم الإنشائي الفعال (Sneff) من طريقة اختبار الانحراف غير الإتلافي (NDT) (AASHTO, 1993).

٩-٥-٤-٣ القدرة الإنشائية المبنية على العمر المتبقي:

يعتمد نهج العمر المتبقي للتقييم الإنشائي اعتمادًا مباشرًا على المفاهيم الموضحة في الشكل (٩-١). وهذا يرتكز إلى مفهوم تلف الكلل بأن الأحمال المتكررة تؤدي تدريجيًا إلى إتلاف الرصف، ومن ثم تخفيض عدد الأحمال الإضافية التي يستطيع أن يحملها الرصف وصولاً إلى حالة الانهيار. يمكن ألا يظهر أدنى مؤشر ملحوظ للتلف في أي وقت من الأوقات، غير أنه يكون هناك انخفاض في القدرة الإنشائية من حيث القدرة على حمل الأحمال المستقبلية (عدد الأحمال المستقبلية التي يمكن أن يحملها الرصف).

ولتحديد العمر المتبقي للرصف، يلزم تحديد المقدار الفعلي للمرور التي حملها الرصف حتى الآن، فضلاً عن إجمالي حجم المرور الذي يتوقع أن يتحمله الرصف إلى أن يصل إلى حالة (الانهيار). ويتوافق الانهيار مع مستوى قابلية الخدمة البالغ ١,٥ ليتسق مع معادلات طريق اختبار (AASHTO). ويجب التعبير عن كلا مقداري المرور بمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل). ويعرّف الفرق بين هاتين القيمتين، معبرًا عنه كنسبة مئوية من إجمالي المرور وصولاً إلى "الانهيار"، باعتباره العمر المتبقي.

المعادلة (٩-٨)

$$RL = 100 \times \left[1 - \left(\frac{N_p}{N_{1.5}}\right)\right]$$

حيث:

RL = العمر التشغيلي المتبقي، ٪.

N_p = إجمالي المرور حتى الآن، بمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨,١٦ طن.

$N_{1.5}$ = إجمالي المرور حتى "انهيار الرصف"، بمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨,١٦ طن.

لمعرفة العمر المتبقي، يمكن تقدير إجمالي المرور حتى انهيار الرصف ($N_{1.5}$) بشكل تقريبي باستخدام معادلات تصميم الرصفيات الجديدة أو الرسوم البيانية التصميمية (nomograph). ومن أجل الاتساق مع مواصفات طريق اختبار (AASHTO) وتطوير تلك المعادلات، يوصى بأن يكون مؤشر قابلية الخدمة يساوي ١,٥ وبمستوى موثوقية ٥٠ ٪.

يُحدد الرقم الإنشائي الفعال (SN_{eff}) بتطبيق المعادلة التالية:

المعادلة (٩-٩)

$$SN_{eff} = CF \times SN_o$$

حيث:

CF = عامل الحالة المحدد من الشكل (٩-٦).

SN_o = الرقم الإنشائي للرصف إذا كان قد أنشئ حديثًا.

يُحسب الرقم الإنشائي للرصف المُنشأ حديثًا (SN_o) وفقًا للمعادلة التالية:

المعادلة (٩-١٠)

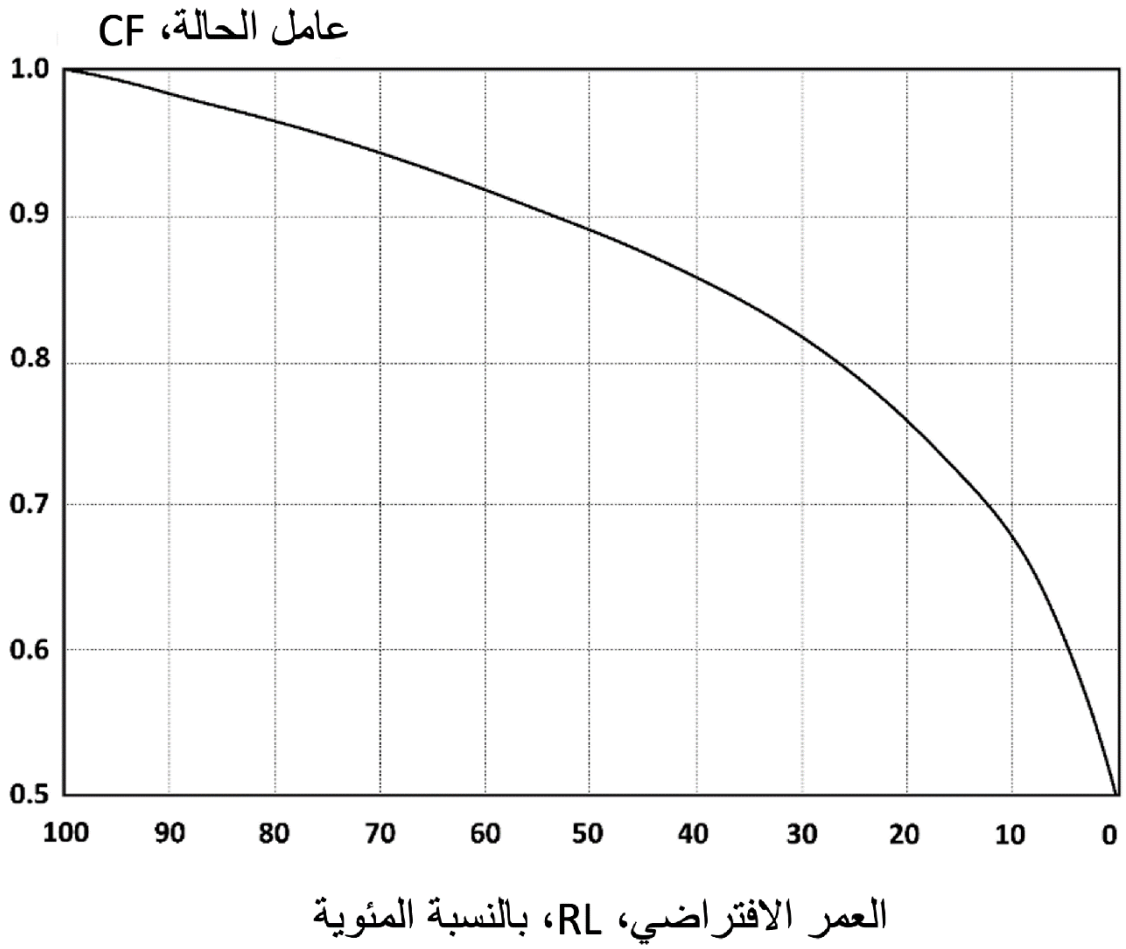
$$SN_o = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3$$

حيث:

D_1 و D_2 و D_3 = سماكة الطبقة الأسفلتية وطبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس، على التوالي (بالبوصة).

a_1 و a_2 و a_3 = المعاملات الإنشائية للطبقة الأسفلتية وطبقات الأساس وطبقة ما تحت الأساس، على التوالي

m_2 و m_3 = معاملات الصرف لطبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس، على الترتيب.



الشكل (٩–٦) العلاقة بين عامل الحالة والعمر المتبقي (AASHTO, 1993).

القيم الموصى بها للمعاملات الإنشائية لتحديد الرقم الإنشائي للرصف إذا كان قد أنشئ حديثًا (SN_o) هي a_1 = 0.44، و a_2 = 0.14 و a_3 = 0.11. قيم معاملي الصرف m_2 = m_3 = ١,٠.

٩-٦ عملية التصميم الميكانيكي-التجريبي لإعادة تأهيل الرصفيات المرنة:

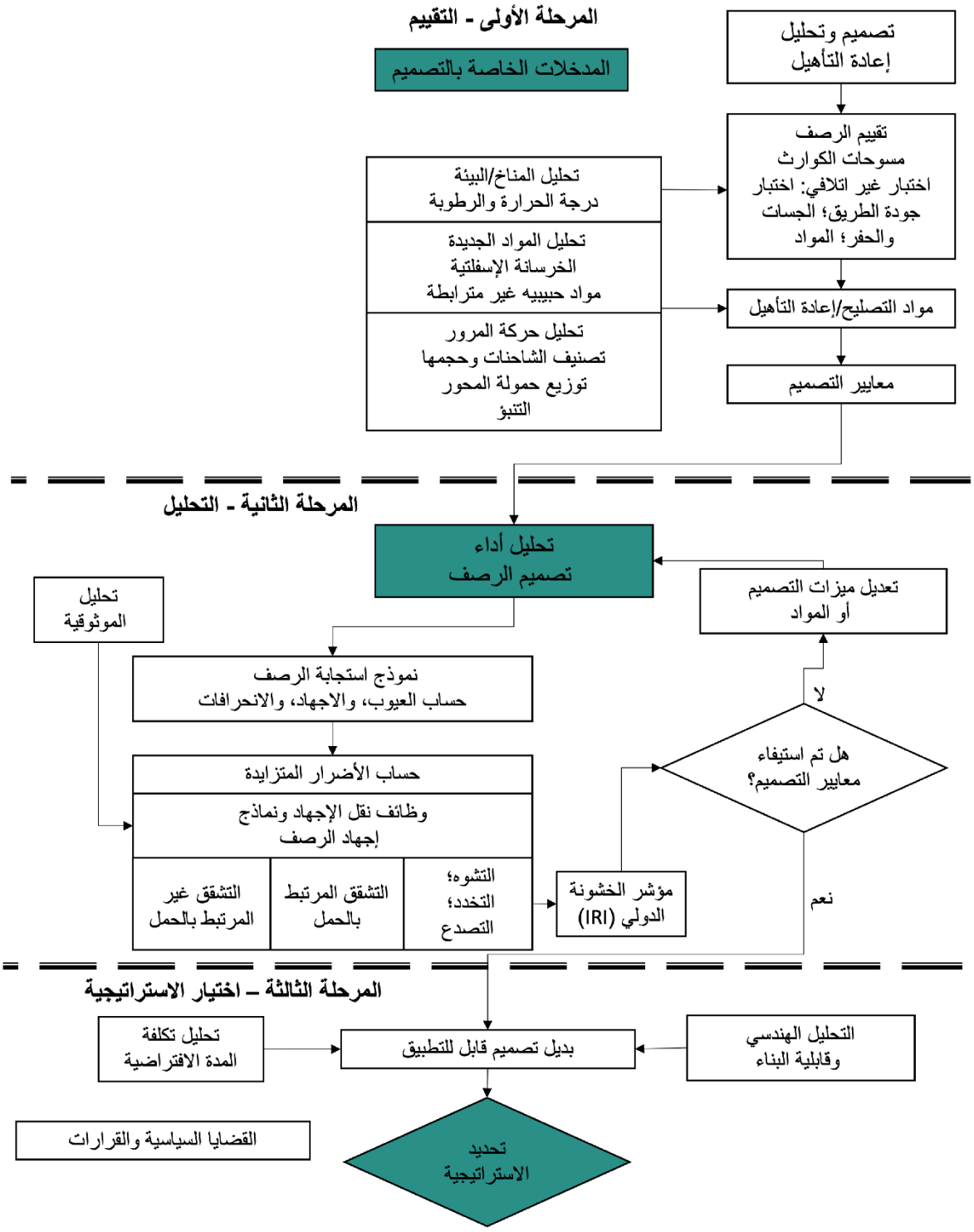
٩-٦-١ المبادئ الأساسية:

تعد عملية تصميم إعادة التأهيل بطريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG) بمثابة نهج محاولات تكرارية عملي من إعداد المصمم، والذي يبدأ باستراتيجية إعادة تأهيل تجريبية. ويمكن بعد ذلك استخدام البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED) لتحليل التصميم التجريبي بغية التأكد من أنه سيلبي توقعات المستخدم للأداء. ويوضح مخطط التدفق في الشكل (٩-٧) هذه الإجراء المبني على الطريقة الميكانيكية-التجريبية.

فيا يلي أبرز الاستراتيجيات الرئيسة التي يمكن تطبيقها منفردة أو مجتمعة للحصول على خطة إعادة تأهيل فعالة تعتمد على حالة الرصف:

- التكسية الإنشائية، والتي يمكن أن تشتمل على إزالة واستبدال طبقات رصف مُختارة.
- طبقة تكسية غير إنشائية.
- ترميم بدون طبقة تكسية.

يوضح الشكل (٩-٨) الخطوات المقترحة للاستخدام عند تحديد استراتيجية إعادة التأهيل المفضلة.



الشكل (٩–٧) مخطط التدفق المفاهيمي لعملية التصميم/التحليل ثلاثية المراحل لتصميم إعادة التأهيل (AASHTO, 2020).



الشكل (٩–٨) خطوات لتحديد استراتيجية إعادة التأهيل المفضلة.

٩-٦-٢ تحديد حالة الرصف الراهنة:

يسرد الجدول (٩-٢) مستويات المدخلات المقترنة بإعداد وتنفيذ خطة تقييم الرصف بما يدعم طريقة دليل التصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (MEPDG).

الجدول(٩–٢) مستويات المدخلات الهرمية لبرنامج تقييم الرصف لتحديد المدخلات الخاصة بطبقات الرصف القائمة بهدف تصميم إعادة التأهيل (AASHTO, 2020).

نشاط التقييم	مستوى المدخلات لتصميم إعادة تأهيل الرصف			الغرض من النشاط
	١	٢	٣	
تقييم مبدئي: راجع الملفات والمعلومات التاريخية،	نعم	نعم	نعم	قدر مدى ملاءمة الكفاءة الإنشائية الإجمالية ومتانة المواد للرصف القائم، ثم قسم المشروع إلى حالات متشابهة من حيث: • الطبقات القائمة.

نشاط التقييم	مستوى المدخلات لتصميم إعادة تأهيل الرصف			الغرض من النشاط
	١	٢	٣	
وقم بإجراء مسح بصري من داخل مركبة متحركة.				• الأكتاف -إن وجدت-. • سمات الصرف: (سطحية وتحت سطحية). • ثم حدد استراتيجيات إعادة التأهيل المحتملة.
مسوحات سمات الطبقة السطحية: قس المقطع الطولي والضوضاء والاحتكاك للطبقة السطحية القائمة.	نعم المقطع الطولي فقط	نعم المقطع الطولي فقط	لا	حدد مدى ملاءمة الكفاءة الوظيفية للطبقة السطحية. لا تُستخدم مسوحات المقطع الطولي والاحتكاك والضوضاء إلا بهدف تحديد ما إذا كانت إعادة التأهيل مطلوبة؛ لأن السطح -عادة- سيُستبدَل أو سيُحسّن. كما تُستخدم مسوحات المقطع الطولي لتحديد استراتيجية إعادة التأهيل المناسبة - عمق الكشط أو التجليخ الألماسي أو سماكة طبقة التسوية أو لا شيء. قدر القيمة الأولية لمؤشر الخشونة الدولي (IRI) بعد طبقة تكسية الخرسانة الأسمنتية.
مسوحات تفصيلية للحالة حدد نوع العيب القائم ومقداره وشدته	نعم	نعم	لا	قدر مدى ملاءمة الكفاءة الإنشائية أو العمر المتبقي ومتانة المواد لطبقات الرصف القائمة واختر استراتيجية إعادة التأهيل. • التشوّه (التخدد في الخرسانة الأسمنتية) • التشققات (شقوق غير مرتبطة بالأحمال مقابل شقوق الكلل) • عيوب تفكك المواد (تفكك الطبقات، والتشققات وغيرها) • حدد/قسم المناطق التي تعاني من عيوب مختلفة.
مسح رادار الاختراق الأرضي (GPR) قدر سماكة الطبقة وحدد أماكن الاختلالات والسمات	نعم	لا	لا	تحديد مدى الملاءمة الإنشائية، والميزات والاختلالات تحت السطحية، فضلاً عن متانة مواد الرصف الحالي: • تقدير سماكة الطبقة. • تحديد الاختلالات تحت السطحية المحتملة. • تحديد أماكن الفراغات التي في أسفل الطبقة السطحية للرصف. • تحديد أماكن التعرية والإزاحة في طبقات الخرسانة الأسمنتية.
اختبارات حوض الانحراف قس استجابة الحمل للهيكل الإنشائي للرصف وأساساته	نعم	نعم	لا	حدد مدى الملاءمة الإنشائية والمعامل الموضعي لطبقة التأسيس وطبقات الرصف القائمة. احسب معامل الطبقة لجميع الأحمال. حدد أماكن الجسّات الأرضية والعينات الاسطوانية للاختبارات الإتلافية. المستوى ٢ - تباعد موحد لاختبارات حوض الانحراف بالمناطق المشوبة بعيوب مختلفة. المستوى ١ - تباعد عنقودي لاختبارات حوض الانحراف بالمناطق المشوبة بعيوب مختلفة على امتداد المشروع ككل.
أخذ العينات الاتلافية عينات اسطوانية مُستخرجة وتربة مأخوذة من جسّات أرضية بهدف استعادة المواد لفحصها بصريًا واختبارها معمليًا	نعم	نعم	نعم	حدد مدى ملاءمة الكفاءة الإنشائية ومتانة المواد. التصنيف المرئي للمواد والتربة. تأكيد سماكة الطبقة وأنواع المواد. حدد وأكد الاختلالات تحت السطحية (تفكك الخرسانة الأسمنتية والفراغات وغيرها). حدد العمق للطبقة الصلبة أو القاعدة الصخرية. حدد عمق منسوب المياه. حدد خطوط الالتئام مع تدفق المياه العرضية. المستوى ٣ - جسّات أرضية محدودة بالمناطق المحددة من نشاط التقييم الأولي للرصف. المستويان ١ و٢ - جسّات أرضية وعينات اسطوانية محفورة في كل جزء سبق تحديده من مسح الحالة، واختبارات حوض الانحراف، والتحليل الطيفي للموجات السطحية (SASW) ومسح رادار الاختراق الأرضي (GPR).

نشاط التقييم	مستوى المدخلات لتصميم إعادة تأهيل الرصف			الغرض من النشاط
	١	٢	٣	
فحوصات ميدانية عينات اسطوانية وخنادق في المناطق المعيبة	نعم	لا	لا	اختيار استراتيجية الملاءمة الإنشائية وإعادة التأهيل: • حدد التخدد في كل طبقة رصف من الخنادق المحفورة. • حدد مكان بدء التشققات واتجاه انتشارها.
اختبارات ميدانية اختبارات مقياس اختراق المخروط الديناميكي (DCP) للطبقات غير المترابطة	نعم	لا	لا	• حدد الملاءمة الإنشائية - قدر المعامل الموضعي من اختبارات مقياس اختراق المخروط الديناميكي (DCP) التي أجريت على الطبقة غير المترابطة من أماكن أخذ العينة الاسطوانية.
فحوصات ميدانية خصائص الصرف تحت السطحي	نعم	لا	لا	مدى كفاية الصرف تحت السطحي - فحص سمات الصرف باستخدام كاميرات صغيرة للتحقق من حالة مصارف الحواف والصرف الإيجابي.
اختبارات معملية المواد غير المترابطة والتربة وخلطات الخرسانة الأسمنتية	نعم	نعم	لا	الطبقات التي ستظل في مكانها عقب إعادة التأهيل: اختبارات التصنيف (اختبارات التدرج وحدود أتيربيرج). اختبارات وزن الوحدة ومحتوى الرطوبة. اختبارات القوة - طبقات خرسانة الأسمنت البورتلاندي والخرسانة الأسمنتية. المستوى ٣- تستند جميع المدخلات على القيم الافتراضية والتصنيف المرئي للمواد والتربة، ولن يُنفَّذ أي اختبارات معملية على الطبقات التي ستظل في مكانها. المستوى ٢ - قُدِّر المعامل من اختبارات مقياس اختراق المخروط الديناميكي وحوض الانحراف للطبقات غير المترابطة والخواص الحجمية للطبقات المترابطة. المستوى ١- الاختبارات المعملية المذكورة أعلاه.

يوفر الجدول (٩-٣) تعريفاً لحالة السطح، ويلخص خيارات إعادة التأهيل المقترحة لكل من هذه التصنيفات العامة. بالنسبة لمستوى المدخلات ١، تُستخدَم عينات اسطوانية وخنادق لمعرفة مقدار التخدد داخل كل طبقة رصف وما إذا كانت أي من التشققات التي حدثت قد بدأت عند الطبقة السطحية أو في قاع طبقات الخرسانة الأسمنتية. بالنسبة لمستوى المدخلات ٢، تُستخدَم عينات اسطوانية لتقدير مقدار التخدد داخل كل طبقة وتحديد المكان الذي بدأت منه أي شقوق متعلقة بالأحمال.

الجدول (٩–٣) تعريفات لحالة السطح لتصنيفات حالة الرصف من المستوى ٣ للمدخلات وخيارات إعادة التأهيل المقترحة (AASHTO, 2020).

الحالة العامة	تصنيف حالة الرصف العام (المستوى ٣ للمدخلات)		خيارات إعادة التأهيل للنظر فيها (مع أو بدون معالجة ما قبل طبقة التكسية)
مناسب **(لم يزل هناك عمر متبقٍ)**	ممتاز	لا يوجد تشققات و/أو تخدد طفيف و/أو عيوب بسيطة متعلقة بالخلطة (تفكك - على سبيل المثال-)، خشونة، أو تشوهات ضئيلة، أو منعدمة على السطح.	إصلاحات السطح دون طبقات تكسية. استراتيجية الصيانة الوقائية للرصفيات. طبقة تكسية غير إنشائية. طبقة تكسية مصممة لمستويات مرور الشاحنات المستقبلية.

الحالة العامة	تصنيف حالة الرصف العام (المستوى ٣ للمدخلات)		خيارات إعادة التأهيل للنظر فيها (مع أو بدون معالجة ما قبل طبقة التكسية)
	جيد	حمل محدود و/أو شقوق غير مرتبطة بالأحمال، تخدد من بسيط إلى متوسط، و/أو عيوب متوسطة ذات صلة بالخلطة. بعض التشوهات والخشونة بالسطح.	استراتيجية الصيانة الوقائية للرصفيات. طبقة تكسية مصممة لمستويات مرور الشاحنات المستقبلية، مع أو بدون كشط وإصلاحات للسطح.
هامشي (يمكن أن يوجد أو لا يوجد عمر متبقٍ)	مقبول	أحمال معتدلة و/أو تشققات غير مرتبطة بالأحمال، تخدد متوسط، كميات متوسطة من العيوب المرتبطة بالخلطة، و/أو بعض الخشونة (مؤشر الخشونة الدولي أكبر من ١٢٠ بوصة/ميل)	يوصى باستخدام معالجات ما قبل طبقة التكسية. طبقة تكسية إنشائية، مع أو بدون كشط وإصلاحات سطحية. إزالة واستبدال الطبقة السطحية قبل طبقة التكسية. إعادة التدوير الموضعي قبل طبقة التكسية.
غير ملائم (لا يوجد عمر متبقٍ)	ضعيف	تشقق واسع المدى غير متعلق بالأحمال، تشقق متوسط متعلق بالأحمال، تخدد مرتفع، عيوب واسعة المدى متعلقة بالخلطة و/أو مستويات عالية من الخشونة (حيث مؤشر الخشونة الدولي (IRI) أكبر من ١٧٠ بوصة/ميل)	ينصح بإجراء معالجة ما قبل طبقة التكسية في حال عدم إعادة الإنشاء. طبقة تكسية إنشائية، مع كشط أو طبقة تسوية وإصلاحات سطحية. إزالة واستبدال الطبقات الموجودة قبل طبقة التكسية. إعادة التدوير في الموقع قبل طبقة التكسية. إعادة الإنشاء.
	ضعيف للغاية	تشقق واسع المدى متعلق بالأحمال و/أو أسطح بالغة الخشونة للغاية (مؤشر الخشونة الدولي (IRI) أكبر من ٢٢٠ بوصة/ميل)	ينصح بإجراء معالجة ما قبل طبقة التكسية في حال عدم إعادة الإنشاء. طبقة تكسية إنشائية، مع كشط وإصلاحات سطحية. إزالة واستبدال الطبقات الموجودة قبل طبقة التكسية. إعادة التدوير الموضعي قبل طبقة التكسية. إعادة الإنشاء.

٩-٦-٣ معالجة ما قبل طبقة التكسية:

يجب أن تؤخذ في الحسبان معالجات وإصلاحات ما قبل طبقة التكسية المختلفة؛ بهدف معالجة التدهور في الرصف القائم وتعزيز نعومة السطح وتهيئة ظروف دعم موحدة لطبقة تكسية الخرسانة الأسفلتية. للرصفيات المرنة أو شبه الصلبة القائمة حاليًا يمكن أن تشمل معالجات ما قبل طبقة التكسية إما عدم اتخاذ أي إجراء أو وضع طبقة تسوية أو خليط من الكشط وإجراء إصلاحات عمق كاملة أو جزئية أو إعادة التدوير الموضعي.

ويسرد الجدول (٩-٤) بعض الإصلاحات المُرشحة أو معالجات ما قبل طبقة التكسية للاستخدام مع جميع أنواع الرصفيات. علمًا بأن تقرير نوع معالجة ما قبل طبقة التكسية المقرر استخدامه قد يعتمد بشكلٍ أكبر على الخبرة السابقة والبيانات التاريخية، وذلك بدلاً من الاعتماد على العيوب ومؤشر الخشونة الدولي (IRI) المتوقع باستخدام البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED).

الجدول (٩–٤) الإصلاحات أو معالجة ما قبل طبقة التكسية المُرشَّحة للاستخدام مع الرصفيات المرنة (AASHTO, 2020).

العيب	المعالجات الوقائية	المعالجات الإصلاحية
تشقق تمساحي	عازل سطحي/ضبابي.	إصلاح كامل العمق.
	رقعة سطحية.	
تشقق طولي	إغلاق الشقوق بمادة عازلة.	إصلاح العمق جزئيًا.

العيب	المعالجات الوقائية	المعالجات الإصلاحية
تشقق انعكاسي	انشر-و-اعزل.	إصلاح كامل العمق.
شقوق كتلية	إغلاق الشقوق بمادة عازلة.	إغلاق الشقوق بمادة عازلة حبيبية أسفلتية.
	إغلاق الشقوق بمادة عازلة حبيبية أسفلتية.	
هبوط	لا يوجد.	طبقة تسوية.
		كشط السطح.
تخدد	لا يوجد.	طبقة تسوية.
		كشط السطح.
تفكك	مادة عازلة تجديدية.	إغلاق الشقوق بمادة عازلة حبيبية أسفلتية/عازل سطحي.
حفر	إغلاق الشقوق بمادة عازلة.	إصلاحات العمق بالكامل أو جزئيًا.
	رُقع سطحية.	

وقد أصبحت عمليات الكشط على البارد وإعادة التدوير الموضعي من أشهر معالجات ما قبل طبقة التكسية بالنسبة لرصفيات الخرسانة الأسفلتية. إذ أن معدات الكشط على البارد يمكنها أن تزيل بسهولة ما يصل إلى ٧٦,٢ - ١٠١,٦ مم (٣-٤ بوصة) من الخرسانة الأسفلتية في عملية مرور واحدة؛ علمًا بأن إزالة الجزء المتشقق والمتيبس من سطح الخرسانة الأسفلتية عن طريق الكشط البارد يؤدي إلى تحسين أداء طبقة التكسية من الخرسانة الأسفلتية نظرًا لأنه يوفر احتكاكًا جيدًا للسطح البيني ويقضي على عيوب الطبقة السطحية. كما أن الكشط البارد يزيد أيضًا من نعومة الرصف الحالي عن طريق إزالة التخدد والتشوهات السطحية الأخرى. وعمق الكشط عبارة عن أحد المدخلات في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED)، ويقصد به الإشارة إلى مقدار التلفيات المُزالة من الطبقة السطحية القائمة قبل وضع طبقة تكسية جديدة. تُحسب سماكة طبقات الخرسانة الأسفلتية القائمة، والممثلة في طريقة دليل تصميم الرصف الميكانيكي-التجريبي (MEPDG)، عن طريق طرح عمق الكشط من سماكة طبقات الخرسانة الأسفلتية المُقاسة من العينات الاسطوانية.

وفي تلك الحالات، يمكن أن يكون إعادة التدوير الموضعي أحد خيارات إعادة الإنشاء؛ حيث يتعذر وضع طبقة تكسية من الخرسانة الأسفلتية بسبب مدى الإصلاح المطلوب؛ بهدف تهيئة ظروف دعم منتظمة. وقد أتاحت التطورات الحديثة في المعدات تنفيذ إعادة تدوير الرصفيات الموجودة على عمق ٢٠٢,٣ – ٣٠٤,٨ ملم (٨ - ١٢ بوصة). إذا كانت عملية إعادة التدوير الموضعية تحتوي على جميع طبقات الخرسانة الأسفلتية الحالية (المُعرَّفة بالسحق)، فعندئذٍ يمكن التعامل معها باعتبارها استراتيجية تصميم جديدة للرصف المرن. ويمكن معالجة الطبقة المسحوقة كطبقة حبيبية في حال عدم تثبيتها أو كطبقة مُثبّتة في حال إضافة مستحلب أسفلتي أو نوع آخر من المثبتات قبل الدمك.

٤-٦-٩ تحديد معامل التلف للمواد المترابطة ولاحتكاك السطح البيني المُخفّض:

في تحليل طبقة التكسية، يُوصّف معامل طبقات مترابطة معينة من الرصف القائم من خلال معامل تلف يمثل الحالة في أثناء وضع طبقة التكسية. ويُقلَّل معامل الخرسانة الأسفلتية بسبب التلفيات الناجمة عن المرور خلال فترة طبقة التكسية. وقد أجريت محاكاة للتلفيات في الخرسانة الأسفلتية في البرنامج الحاسوبي (AASHTOWare) للتصميم الميكانيكي-التجريبي للرصف (PMED) باعتباره تخفيض المعامل لتلك الطبقة. وبالنسبة لطبقات الخرسانة الأسفلتية القائمة، تُستخدم للمستويين ٢ أو ٣ للمدخلات والقيم المحسوبة عكسيًا من أحواض مقياس انحراف الثقل الساقط (FWD) لتقدير المعامل الديناميكي. ويسرد الجدول (٩-٥) الخواص الموضعية لخلطة الأسفلت الساخن في وقت تقييم الرصف المطلوبة لتصميم إعادة التأهيل.

الجدول (٩–٥) مواد الأسفلت وبروتوكولات الاختبار لقياس مدخلات خواص مواد طبقات خلطة الأسفلت الساخن القائمة (AASHTO, 2020).

الخاصية المُقاسة	مصدر البيانات		بروتوكول الاختبار المُوصى به و/أو مصدر البيانات
	اختبار	تقدير	
معامل الطبقة المحسوب عكسيًا لمقياس انحراف الثقل الساقط (FWD)	x		AASHTO T256 and ASTM D5858
نسبة بواسون		X	استخدم القيمة الافتراضية لطريقة دليل تصميم الرصف الميكانيكي-التجريبي
ثقل الوحدة	x		AASHTO T166
المحتوى الأسفلتي	x		AASHTO T164
التدرج	x		AASHTO T27
الفراغات الهوائية	x		AASHTO T209
استعادة الأسفلت	x		AASHTO T164 / T170 / T319

يجب أن تُميز النتائج المستخلصة من استقصاء الرصف، أي مناطق أو طبقات محتملة يكون احتكاك السطح البيني فيها مُخفّضًا أو منعدمًا. وعادةً ما يُوّصف احتكاك السطح البيني المُخفّض بوجود شقوق انزلاقية وحفر. وفي حال وجود مثل هذه الحالات، يمكن النظر في إزالة الطبقات التي تعرضت لشقوق انزلاقية، أو ينبغي تقليل معلمة مدخلات احتكاك السطح البيني في تصميم طبقة التكسية إلى صفر بين تلك الطبقات المتلاصقة.

٩-٦-٥ تحديد خواص المواد غير المترابطة القائمة:

يُلخص (٩-٦) معلمات المستوى ١ للمدخلات اللازمة لأنواع مواد التربة الحبيبية غير المترابطة لطبقة الأساس، وطبقة ما تحت الأساس، وجسر الطريق، والقاعدة الترابية. وتُسرَد أيضًا بروتوكولات الاختبار الموصى بها في الجدول (٩-٦).

الجدول (٩–٦) متطلبات مواد التربة الحبيبية غير المترابطة لطبقة الأساس، وطبقة ما تحت الأساس، وجسر الطريق، والقاعدة الترابية وبروتوكولات الاختبار للمواد القائمة (AASHTO, 2020).

نوع التصميم	الخاصية المُقاسة	مصدر البيانات		بروتوكول الاختبار المُوصى به و/أو مصدر البيانات
		اختبار	تقدير	
المواد القائمة (المستخرجة)	هناك خياران: معاملات الانحدار k_1 و k_2 و k_3 للنموذج المكونات المعمم الذي يُعرّف معامل المرونة كدالة في حالة الإجهاد واستخلاص علاقة انحدار من اختبارات معامل المرونة المعملية. حدد متوسط معامل مرونة التصميم لحالة الإجهاد في الموقع والمتوقع حدوثها من خلال اختبارات معامل المرونة في المعمل.	X		(AASHTO T307) أو (NCHRP 1-28A) نموذج طريقة دليل تصميم الرصف الميكانيكي-التجريبي (MEPDG) المعمم هو كالتالي: $M_R = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$ حيث: M_R= معامل المرونة ، رطل لكل بوصة مربعة $\theta = \sigma_3 + \sigma_2 + \sigma_1$ = الإجهاد الكلي

نوع التصميم	الخاصية المُقاسة	مصدر البيانات		بروتوكول الاختبار المُوصى به و/أو مصدر البيانات
		اختبار	تقدير	
				σ_1 = الإجهاد الرئيس الشديد σ_2 = الإجهاد الرئيس المتوسط σ_3 = الإجهاد الرئيس الطفيف الذي يحصر الضغط τ_{oct}= إجهاد القص ثماني السطوح $=\frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2}$ p_a = تطبيع (normalizing) الإجهاد k_1 و k_2 و k_3 = ثوابت الانحدار
	نسبة بواسون		x	لا توجد مواصفة اختبار وطنية، لذا استخدم القيم الافتراضية لطريقة دليل تصميم الرصف الميكانيكي-التجريبي
	أقصى كثافة جافة	x		T180 (AASHTO)
	محتوى الرطوبة الأمثل	x		T180 (AASHTO)
	التدرج	x		T88 (AASHTO)
	الثقل النوعي	x		T100 (AASHTO)
	الموصلية الهيدروليكية المشبعة	x		T215 (AASHTO)
	معلمات منحنى خصائص المياه والتربة	x		لوحة الضغط ((AASHTO) (T99، أو ورقة الترشيح ((AASHTO) (T180، أو خلية درجة الحرارة ((AASHTO) T100)
المواد القائمة والتي من المقرر تركها في المكان	المعامل المحسوب عكسيًا لمقياس انحراف الوزن الساقط	x		مواصفة (AASHTO) رقم T256 ومواصفة الجمعية الأمريكية لاختبار المواد رقم D5858
	نسبة بواسون		x	استخدم القيم الافتراضية المدرجة في طريقة دليل تصميم الرصف الميكانيكي-التجريبي

بالنسبة للمستويين ٢ و٣ للمدخلات، يرجى الرجوع إلى الجدول (٥-٢٢) لتوصيف التربة الحبيبية غير المترابطة لكل من طبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس وجسر الطريق ومواد القاعدة الترابية.

٩-٦-٦ طبقة تكسية من الخرسانة الأسمنتية للرصفيات المرنة القائمة:

يمكن استخدام طبقات تكسية من الخرسانة الأسفلتية للرصفيات المرنة بهدف استعادة القطاع الطولي للسطح أو تزويد الرصف الحالي بقوة إنشائية. ويجب اختيار طبقة التكسية التجريبية ومعالجات ما قبل طبقة التكسية مع مراعاة حالة الرصف القائم، والأساسات، ومستويات المرور المستقبلية. ويمكن أن تصل طبقات طبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية إلى أربع طبقات، بما يشمل ثلاث طبقات أسفلتية وطبقة واحدة من الركام غير المترابط (مقطع محصور بين طبقتين/sandwich) أو طبقة مثبتة كيميائيًا.

كما تستخدم نفس العيوب المنطبقة على تصميمات الرصف المرن الجديد في تصميمات إعادة تأهيل الرصفيات المرنة (الجزء الفرعي ٥-٣-٨). بالنسبة للرصفيات المغطاة بطبقة تكسية، يشتمل تحليل العيوب على اعتبارات العيوب (التشقق والتخدد) التي تنشأ في طبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية وكذلك استمرارية التلفيات والتخدد في طبقات الرصف القائمة. كما أن إجمالي العيوب المتوقعة من طبقات الرصف القائمة وطبقة التكسية من الخرسانة الأسفلتية تُستخدم للتنبؤ بقيم مؤشر الخشونة العالمي (IRI) بمرور الوقت (الجزء الفرعي ٥-٣-٨). ومن المتوقع أن تتعرض طبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية لعيوب التشقق الطولي والحراري في نفس الأماكن لتصميمات الرصف الجديد. وتُقيَّم تلفيات الكلل في الجزء السفلي لطبقة التكسية من طبقة الخرسانة الأسفلتية باستخدام نموذج تشقق

الكلل التمساحي (القسم الفرعي ٥-٣-٨-٣). في حين يُتنبأ بالتشقق الانعكاسي في طبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية من خلال تطبيق نموذج التشقق الانعكاسي لميكانيكا التكسير المستندة إلى التصميم الميكانيكي-التجريبي، والذي يعتمد على طول الشقوق المستعرضة ومنطقة تشققات الكلل المتجهة من أسفل لأعلى والمقاسة على الطبقة السطحية للرصف القائم.

وتتوقف استمرارية التلف في الرصف القائم على تكوينه، وذلك بعد الأخذ في الاعتبار تأثير معالجات ما قبل طبقة التكسية مثل الكشط، أو إعادة التدوير الموضعي. وباستخدام مفهوم الطبقة التالفة؛ فإن التلف الكللي في طبقات الخرسانة الأسفلتية سيظل يتطور في نفس مكانه في الرصفيات القائمة المرنة وشبه الصلبة. تُحسب جميع استجابات الرصف المستخدمة للتنبؤ بتلف الكلل المستمر في طبقات الخرسانة الأسمنتية القائمة التي لم تزل في مكانها باستخدام معامل التالف، والذي يُحدَّد باستخدام بيانات تقييم الرصف والطرق التي نوقشت في القسم الفرعي (٩-٥-٢-٤). بينما يستخدم معامل غير التالف لتلك الطبقة لتفاعلات الرصف المستخدمة للتنبؤ بتلف الكلل لطبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية.

تُضمَّن نتوءات بلاستيكية في جميع طبقات الخرسانة الأسفلتية والطبقات غير المترابطة عند التنبؤ بالتخدد بالنسبة للرصف المعاد تأهيله. وسوف يستمر تراكم التخدد في طبقات الرصف القائمة، غير أن مُعدله سيكون أقل مقارنةً بالمواد الجديدة، وذلك بسبب تأثير التصلد الانفعالي لمرور الشاحنات السابقة وتوقيتها.

٩-٧ عملية التصميم التجريبي لإعادة التأهيل للرصفيات الصلبة:

٩-٧-١ المبادئ الأساسية:

يوضح الشكل (٩-١) المفاهيم العامة للقصور الإنشائي والقدرة الإنشائية الفعالة؛ حيث تُستخدم سماكة البلاطة (D) للتعبير عن القدرة الإنشائية (SC) للرصفيات الصلبة. تستخدم السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}) للإشارة إلى القدرة الإنشائية للرصف الصلب في توقيت إجراء تقييم لتصميم طبقة التكسية. بينما يُعبَّر عن القدرة الإنشائية المطلوبة للمرور المستقبلي المتوقع خلال فترة تصميم طبقة التكسية باستخدام سماكة البلاطة المطلوبة لتحمل المرور المستقبلي (D_f).

٩-٧-٢ تصميم السماكة لطبقة تكسية من الخرسانة الأسمنتية لرصفيات الخرسانة العادية ذات الفواصل (JPCP) والخرسانة المسلحة ذات الفواصل (JRCP)والخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (CRCP):

في حال وضع طبقة تكسية لرصف الخرسانة العادية ذي الفواصل (JPCP) ورصف الخرسانة المسلحة ذي الفواصل (JRCP) ورصف الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (CRCP) لتحقيق بعض الأغراض الوظيفية كالخشونة أو الاحتكاك، فعندئذٍ يمكن الاقتصار على وضع الحد الأدنى من طبقة التكسية المطلوبة لمعالجة مشكلة الوظيفة. وفي حال وضع طبقة تكسية لأغراض التحسين الإنشائي، فإن السماكة المطلوبة لطبقة التكسية تكون عبارة عن دالة في القدرة الإنشائية المطلوبة لتلبية المتطلبات المرورية المستقبلية وكذلك القدرة الإنشائية للرصف القائم. تُحدد سماكة طبقة التكسية المطلوبة؛ لزيادة القدرة الإنشائية لتحمل المرور المستقبلي من خلال المعادلة التالية:

$$D_{ol} = A \times (D_f - D_{eff})$$ **المعادلة (٩-١١)**

حيث:

D_{ol} = السماكة المطلوبة لطبقة التكسية من الخرسانة الأسفلتية، بوصة.

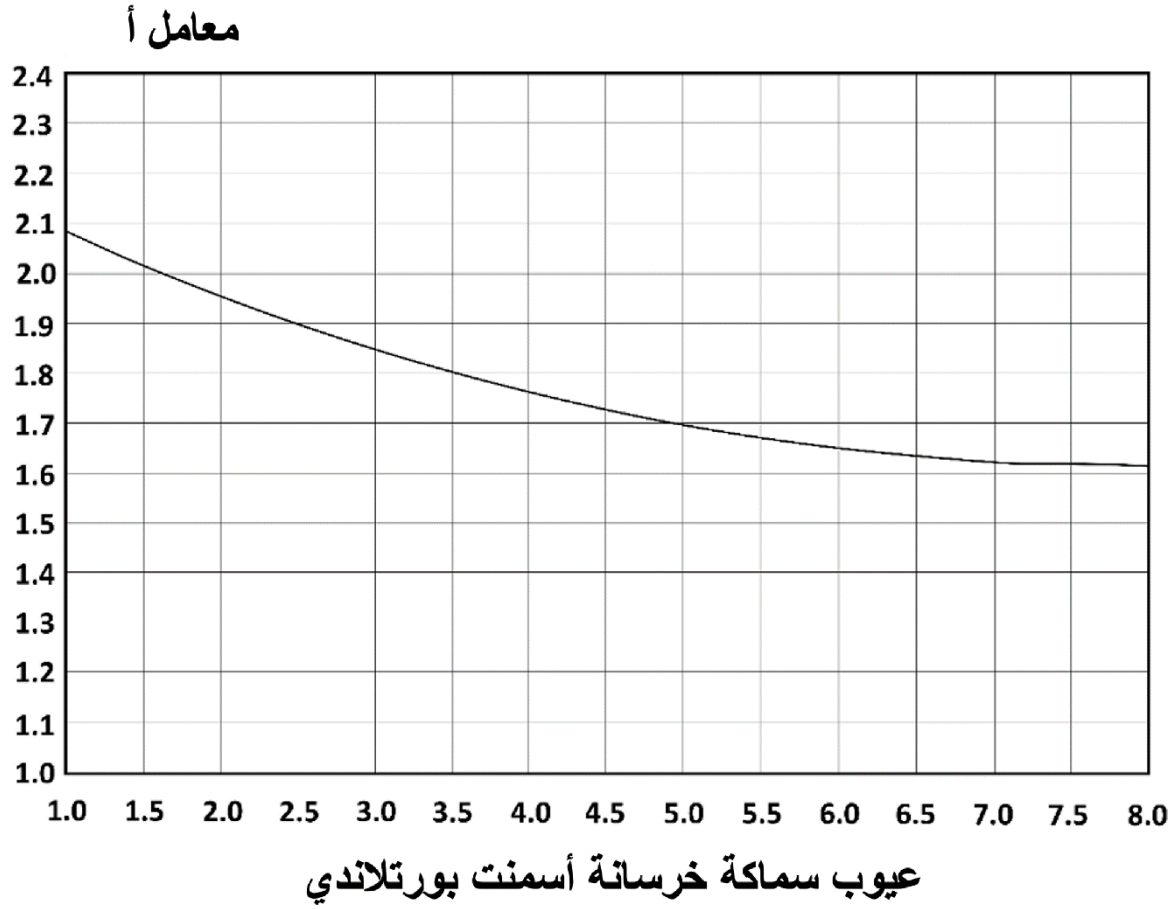
A = عامل تحويل قصور سماكة خرسانة الأسمنت البورتلاندي إلى سماكة طبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية.

D_f = سماكة البلاطة لتحمل المرور المستقبلي. بوصة.

D_{eff} = السماكة الفعالة للبلاطة القائمة، بوصة.

والعامل (A)- الذي هو دالة في قصور سماكة خرسانة الأسمنت البورتلاندي، مُعطى من خلال المعادلة التالية وموضح في الشكل (٩-٩).

$$A = 2.2233 + 0.0099 \times (D_f - D_{eff})^2 - 0.1534 \times (D_f - D_{eff})$$ **المعادلة (٩-١٢)**



الشكل (٩–٩) العامل (A) لتحويل القصور في سماكة خرسانة الأسمنت البورتلاندي إلى سماكة طبقة تكسية من الخرسانة الأسمنتية (AASHTO, 2020).

٩-٧-٢-١ تحديد سماكة البلاطة لتحمل المرور المستقبلي (D_f):

لتحديد سماكة البلاطة المطلوبة لتحمل المرور المستقبلي (D_f)، يُستخدم الرسم البياني التصميمي (nomograph) في الشكل (٦-٦). تؤخذ المعلمات التالية بعين الاعتبار:

- الموثوقية (R)، ٪ (الجزء ٦-٥).
- الانحراف المعياري الكلي (S_o) (الجزء ٦-٥).
- إجمالي عدد مرات تطبيق مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل)، (w_{18}) (الجزء ٦-٤).
- الفاقد في قابلية الخدمة (ΔPSI) (الجزء ٦-٢).
- المعامل الفعال (الساكن) لرد فعل القاعدة الترابية، (قيمة-k).
- معامل المرونة (E) لبلاطة لخرسانة الأسمنت البورتلاندي.
- تحويل حمل الفاصل (J).
- معامل التمزق (S_c').
- الفاقد في دعم البلاطة القائمة.
- قدرة الصرف تحت السطحي للبلاطة القائمة (C_d) (الجدول ٦-١). الحالة السيئة للصرف تحت السطحي تُعطى قيمة (C_d) قدرها ١,٠.

٩-٧-٢-١-١ المعامل الفعال (الساكن) لرد فعل القاعدة الترابية التصميمية، (قيمة-k):

ستُحدَّد (قيمة-k) الفعالة الساكنة أسفل بلاطة خرسانة أسمنت بورتلاندي قائمة استنادًا إلى قياسات الانحراف؛ قس أحواض انحرافات البلاطات على طول المشروع على مسافات كافية لتقييم الأوضاع بشكلٍ مناسب. وتكون المسافات الفاصلة التي تتراوح من ٣٠ إلى ٣٠٠ م (من ١٠٠ إلى ١٠٠٠ قدم) هي النموذجية. قس الانحرافات باستخدام مستشعرات توضع عند ٠، ٣٠٠، ٦٠٠، ٩٠٠ ملم من مركز الثقل. قس الانحرافات في مسار العجلة الخارجية. يوصى باستخدام مقياس انحراف الثقل الساقط ومقدار حمولة قدره ٤٠ كيلو نيوتن. وتوفر المواصفتان (ASTM D4694) و (ASTM D4695) إرشادات إضافية بشأن اختبار الانحراف. تُحسب عكسيًا(قيمة-k) الديناميكية الفعالة لكل بلاطة خضعت للاختبار باستخدام الشكل (٩-١٠).

وتُحتسَب المساحة (AREA) لكل حوض انحراف من خلال المعادلة التالية:

$$\boldsymbol{AREA = 6 \times \left[1 + 2 \times \left(\frac{d_{12}}{d_0}\right) + 2 \times \left(\frac{d_{24}}{d_0}\right) + \left(\frac{d_{36}}{d_0}\right)\right]}$$ **المعادلة (٩-١٣)**

حيث:

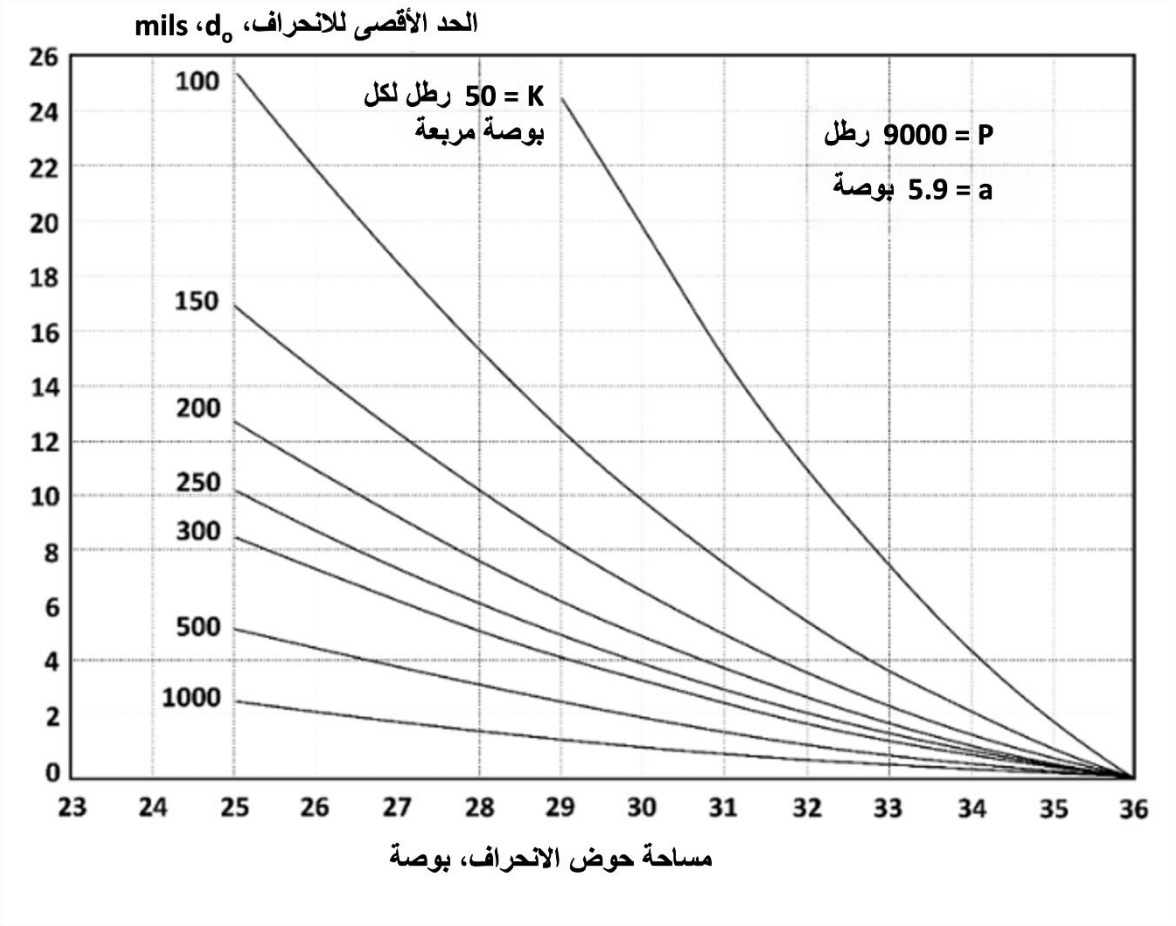
d_0 = الانحراف في مركز لوح التحميل، بالبوصة.

d_i = الانحرافات عند ٣٠٠ ، ٦٠٠ ، ٩٠٠ مم (١٢، ٢٤، ٣٦ بوصة) من مركز لوح التحميل، بوصة.

استخدم الشكل (٩-١٠) مع الانحراف في مركز لوح التحميل (d_0) والمساحة (AREA) لتحديد (قيمة-k) الديناميكية الفعالة أسفل كل بلاطة لنصف قطر تحميل دائري يبلغ ١٥٠ مم (٥,٩ بوصة) ومقدار يبلغ ٤٠ كيلو نيوتن (٩,٠٠٠ رطل). بالنسبة للأحمال التي تقع في حدود حوالي ٨,٩ كيلو نيوتن (٢,٠٠٠ رطل)، يمكن تكبير الانحرافات خطيًا لما يعادلها عند ٤٠ كيلو نيوتن.

عند تصميم سماكة طبقة تكسية واحدة لمقطع منتظم، احسب متوسط (قيمة-k) الديناميكية الفعالة للبلاطات التي خضعت للاختبار في المقطع المنتظم.

إن (قيمة-k) الساكنة الفعالة تساوي (قيمة-k) الديناميكية الفعالة مقسومة على ٢. ويمكن أن يتطلب الأمر تعديل (قيمة-k) الساكنة الفعالة للتأثيرات الموسمية باستخدام النهج المبين في الجزء الفرعي (٦-٧-١).

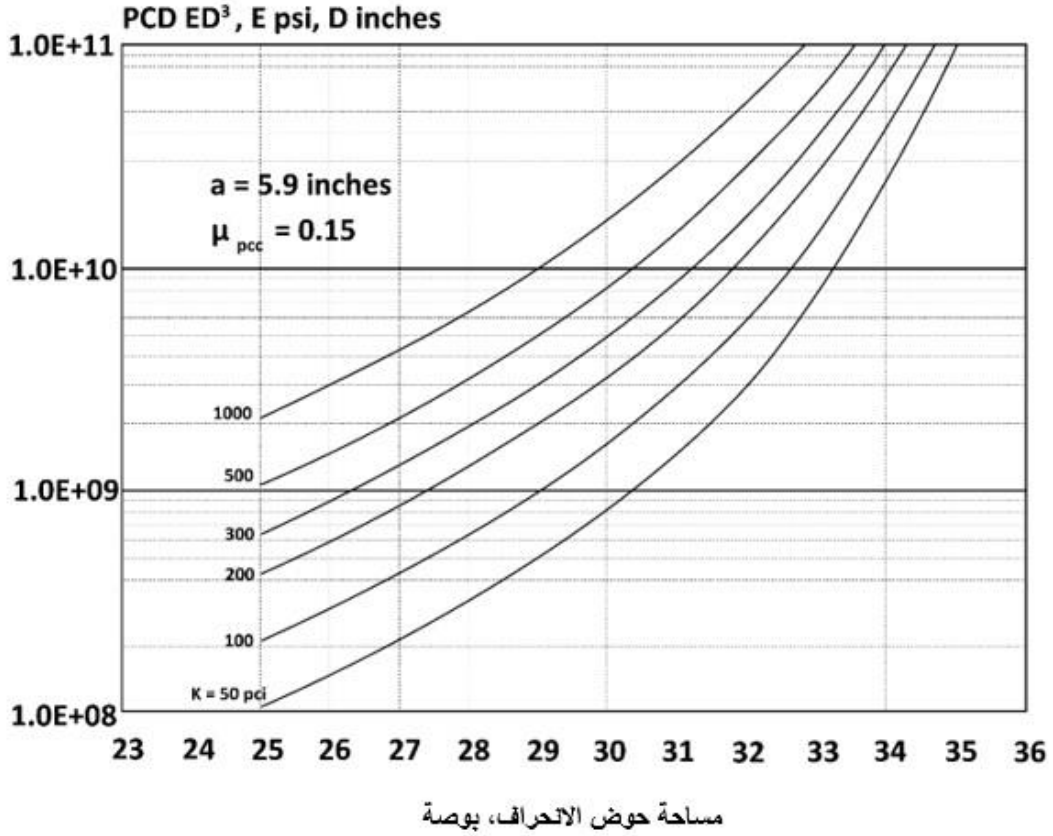


الشكل (٩–١٠) تحديد (قيمة-k) الديناميكية الفعالة - من قيمة الانحراف في مركز لوح التحميل (do) والمساحة (AREA) (AASHTO, 2020).

٩-٧-٢-١-٢ معامل المرونة (E) لبلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي:

سيُحدَّد معامل المرونة (E) لبلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي استنادًا إلى قياسات الانحراف؛ حيث تُقاس أحواض انحراف البلاطات على طول المشروع وعلى مسافات كافية لتقييم الأوضاع بشكلٍ مناسب. وتكون المسافات الفاصلة التي تتراوح من ٣٠ إلى ٣٠٠ م (من ١٠٠ إلى ١,٠٠٠ قدم) هي النموذجية. قس الانحرافات باستخدام مستشعرات توضع عند ٠، ٣٠٠، ٦٠٠، ٩٠٠ ملم من مركز الثقل. قس الانحرافات في مسار العجلة الخارجية. ينصح باستخدام مقياس انحراف الثقل الساقط وأن يكون مقدار الحمولة ٤٠ كيلو نيوتن. وتوفر. وتوفر المواصفتان (ASTM D4694) و (ASTM D4695) إرشادات إضافية بشأن اختبار الانحراف. يُحسب عكسيًا المعامل المرن لكل بلاطة خضعت للاختبار باستخدام الشكل (٩-١١). وفي هذا الشكل، أدخل المساحة (AREA) ثم استمر إلى منحنيات (قيمة-k) الديناميكية الفعالة، وحدد قيمة (ED^3)، حيث (D) تُعبر عن سماكة البلاطة. حل المعادلة لإيجاد معامل المرونة (E) بمعرفة سماكة البلاطة (D). وتتراوح قيم معامل المرونة (E) النموذجية للبلاطة من ٢٠,٦٨٤ – ٥٥,١٥٨ ميجا باسكال (٣ - ٨ × 10^6 رطل لكل بوصة مربعة). إذا كانت القيمة الناتجة لمعامل المرونة (E) للبلاطة تقع خارج هذا المدى، فيمكن أن يكون هناك خطأ في السماكة المفترضة للبلاطة، أو يمكن أنه أُجري قياس حوض الانحراف فوق أحد الشقوق، أو يمكن أنه يوجد تدهور جوهري في خرسانة الأسمنت البورتلاندي.

عند تصميم سماكة طبقة تكسية واحدة لمقطع منتظم، احسب متوسط قيمة معامل المرونة (E) للبلاطات التي خضعت للاختبار في المقطع المنتظم.



الشكل (٩–١١) تحديد معامل مرونة خرسانة الأسمنت البورتلاندي باستخدام (قيمة-k) والمساحة (AREA) وسماكة البلاطة (AASHTO, 2020).

٩-٧-٢-١-٣ تحويل حمل الفاصل:

بالنسبة لرصف الخرسانة العادية ذي الفواصل (JPCP) ورصف الخرسانة المسلحة ذي الفواصل (JRCP)، قس تحويل حمل الفاصل في مسار العجلة الخارجية عند فواصل مستعرضة مُمثّلة. ولا تقس تحويل الحمل إذا كانت درجة الحرارة المحيطة أكبر من ٢٦,٧ درجة مئوية (٨٠ درجة فهرنهايت). ضع لوح التحميل على أحد جانبي الفاصل؛ بحيث تكون حافة اللوح ملامسة للفاصل. قس الانحراف عند مركز لوح التحميل وعلى بعد ٣٠٥ مم (١٢ بوصة) من المركز. احسب تحويل حمل الانحراف من المعادلة التالية:

المعادلة (٩-١٤)

$$\Delta LT = 100\left(\frac{\Delta_{ul}}{\Delta_l}\right) \times B$$

حيث:

ΔLT = تحويل حمل الانحراف، ٪.

Δ_{ul} = انحراف جانبي غير محمل، بوصة.

Δ_l = انحراف جانبي محمل، بوصة.

B = عامل تصحيح انحناء البلاطة.

يعد عامل تصحيح انحناء البلاطة (B) ضروريًا نظرًا لأن الانحرافات (d_0) و(d_{12}) المقاسة على مسافة ٣٠٥ مم (١٢ بوصة) بينهما لن تكون متساوية حتى لو خضعت للقياس من الجانب الداخلي للبلاطة. ويمكن تحديد القيمة المناسبة لعامل التصحيح من النسبة (d_0) و(d_{12}) لقياسات حوض نموذجي لانحراف بلاطة المركز، حسبما هو موضح في المعادلة أدناه. وتتراوح القيم النموذجية لعامل تصحيح انحناء البلاطة (B) بين ١,٠٥ و١,١٥.

المعادلة (٩-١٥)

$$B = \frac{d_{0center}}{d_{12\ center}}$$

عند تصميم سماكة طبقة تكسية واحدة لمقطع منتظم، احسب متوسط قيمة تحويل حمل الانحراف للفواصل التي خضعت للاختبار في المقطع المنتظم.

بالنسبة لرصف الخرسانة العادية ذي الفواصل (JPCP) ورصف الخرسانة المسلحة ذي الفواصل (JRCP)، حدد معامل تحويل الحمل (J) باستخدام الجدول (٩-٧).

الجدول (٩–٧) معامل نقل الحمل (AASHTO, 1993).

النسبة المئوية لتحويل الحمل	J
أكبر من ٧٠	٣,٢
٧٠ ـ ٥٠	٣,٥
أقل من ٥٠	٤,٠

بالنسبة للرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح (CRCP)، استخدم قيم معامل تحويل الحمل (J) البالغة (٢,٢ - ٢,٦) لتصميم طبقة التكسية، وذلك على افتراض أن الشقوق النشطة قد عولجت باستخدام رصف خرساني مسلح باستمرار.

٩-٧-٢-١-٤ معامل التمزق (S_c') لخرسانة الأسمنت البورتلاندي:

يمكن تقدير معامل التمزق بإحدى طريقتين: (أ) عن طريق إجراء اختبار معملي أو (ب) عن طريق الحساب العكسي لمعامل المرونة (E) للبلاطة.

١- احصل على عدة عينات اسطوانية بقطر ١٥٠ مم بالحفر في منتصف البلاطة واختبرها للشد غير المباشر (ASTM C496). احسب قوة الشد غير المباشرة للعينات الاسطوانية. قدَّر معامل التمزق باستخدام المعادلة التالية:

المعادلة (٩-١٦)

$$S_c' = 210 + 1.02 \times IT$$

حيث:

S_c' = معامل التمزق، رطل لكل بوصة مربعة.

IT = قوة الشد غير المباشرة للعينات الاسطوانية، رطل لكل بوصة مربعة.

٢- قدّر معامل التمزق من خلال معامل المرونة (E) المحسوب عكسيًا للبلاطة باستخدام المعادلة التالية:

المعادلة (٩-١٧)

$$S'_c = 43.5 \times \left(\frac{E}{10^6}\right) + 488.5$$

حيث:

S_C' = معامل التمزق، رطل لكل بوصة مربعة.

E = معامل المرونة المحسوب عكسيًا لبلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي، رطل لكل بوصة مربعة.

بالنسبة للرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح، يمكن استنباط معامل التمزق (S_C') من قيم معامل المرونة (E) المحسوب عكسيًا، شريطة أن يقتصر ذلك على النقاط الخالية من أي تشققات داخل أحواض الانحراف.

٩-٧-٢-١-٥ فقدان الدعم للبلاطة القائمة:

لتصميم سماكة طبقة التكسية، افترض وجود بلاطة مدعومة بالكامل (LS = 0).

٩-٧-٢-٢ تحديد السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}):

هنالك طريقتان لتحديد السماكة الفعالة للبلاطة القائمة هما:

١. المسح البصري واختبارات المواد.
٢. العمر المتبقي.

ينبغي تطبيق كلتا الطريقتين لتحديد السماكة الفعالة (D_{eff})، ثم اختيار قيمتها استنادًا إلى النتائج، وذلك باستخدام الحكم الهندسي.

٩-٧-٢-٢-١ المسح البصري واختبارات المواد:

تُحسب السماكة الفعالة للبلاطة القائمة من المعادلة التالية:

المعادلة (٩-١٨)

$$D_{eff} = F_{jc} \times F_{dur} \times F_{fat} \times D$$

حيث:

D = سمك بلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي القائمة، بوصة.

F_{jc} = عامل تعديل الفواصل والشقوق.

F_{dur} = عامل تعديل المتانة.

F_{fat} = عامل تعديل تلف الكلل.

يُضبَط عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc}) لتعويض الفقد الإضافي في مؤشر قابلية الخدمة الحالية (PSI) والناتج عن الشقوق الانعكاسية المتدهورة في طبقة التكسية والتي ستنتج بسبب كل من الفواصل المتدهورة التي لم تُصلَح والشقوق والانقطاعات الأخرى في البلاطة القائمة قبل طبقة التكسية. ومن الموصى به إصلاح جميع الفواصل المتدهورة والشقوق وأي انقطاعات أخرى في البلاطة القائمة بكامل العمق مع إجراء إصلاحات لخرسانة الأسمنت البورتلاندي المزودة بقضبان وتدية أو المربوطة قبل طبقة التكسية؛ بحيث يكون عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc} = ١,٠٠). وإذا كان يتعذر إصلاح جميع المناطق المتدهورة، فعندئذٍ يصبح من الضروري توافر المعلومات التالية لتحديد عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc})، وذلك بهدف زيادة سماكة طبقة التكسية للأخذ في الحسبان الفقد الإضافي في مؤشر قابلية الخدمة الحالية (PSI) بسبب الشقوق الانعكاسية المتدهورة في المسار التصميمي:

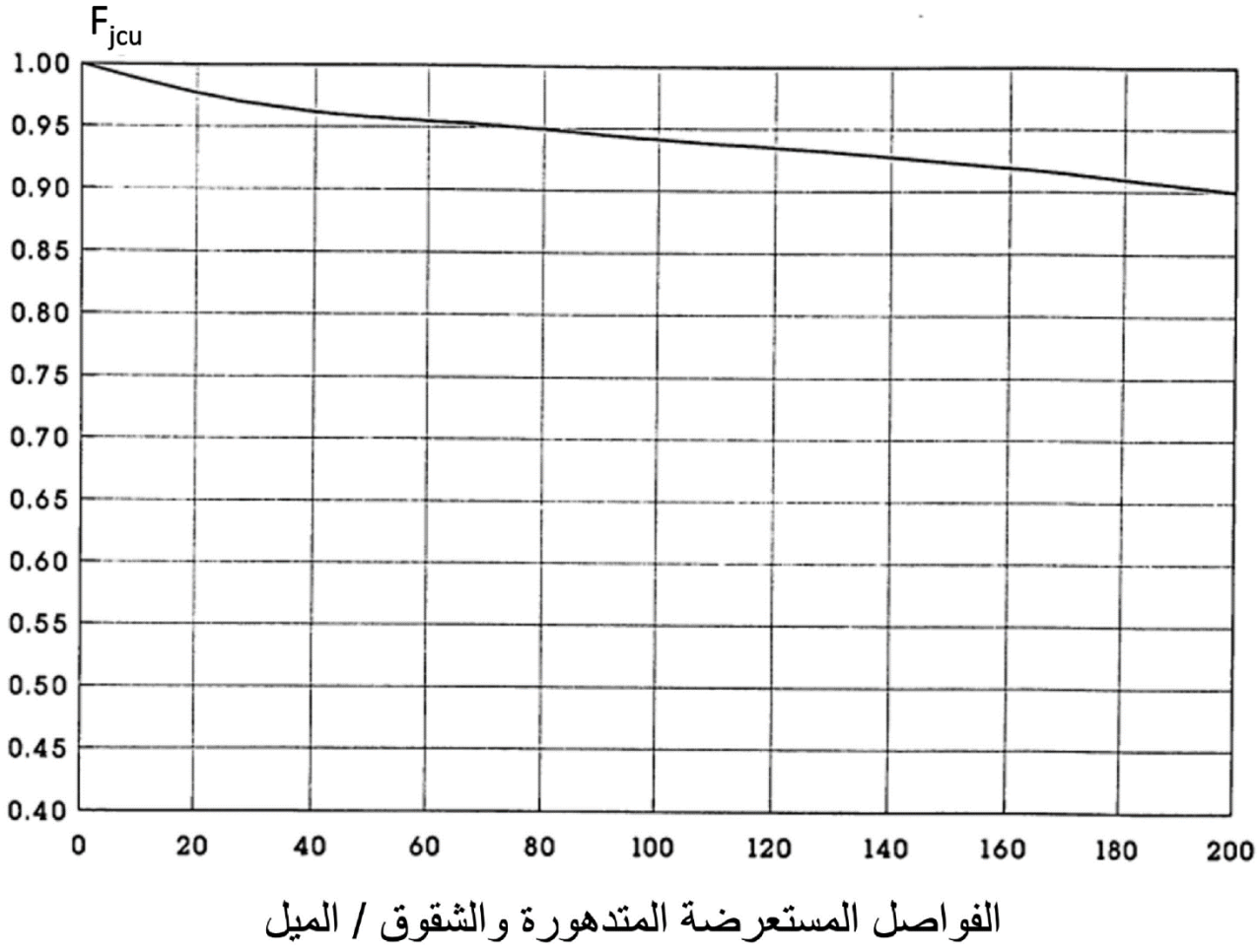
- الرصفيات الخالية من أي شقوق متانة (D-Cracking) أو عيوب ركامية تفاعلية.
  - عدد الفواصل المتدهورة التي لم تُصلح لكل ميل.

- عدد الشقوق المتدهورة التي لم تُصلَح لكل ميل.
- عدد الأجزاء المُكسرة التي لم تُصلَح لكل ميل.
- عدد فواصل التمدّد والفواصل العريضة بشكلٍ استثنائي (أكبر من ٢٥,٤ مم) أو رُقع الخرسانة الأسفلتية كاملة العمق وبعرض كامل المسار لكل ميل.

ويُستخدم العدد الإجمالي للفواصل المتدهورة والشقوق والأجزاء المُكسرة والانقطاعات الأخرى التي لم تُصلَح لكل ميل في المسار التصميمي؛ بهدف استنباط عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc}) من الشكل (٩-١٢).

- الرصفيات التي تحتوي على شقوق متانة (D-Cracking) أو تدهور ركامي تفاعلي:

غالبًا ما تتدهور هذه الأنواع من الرصف عند الفواصل، ويحدث بها تشققات بسبب مشاكل المتانة. يُستخدم عامل تعديل المتانة (F_{dur}) لتعديل سماكة طبقة التكسية بهدف حل هذه المشكلة. ولذلك، ينبغي في مثل هذه الحالة استنباط عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc}) من الشكل (٩-١٢) فقط باستخدام تلك الفواصل المتدهورة والشقوق التي لم تُصلَح بسبب مشاكل المتانة. في حال حدوث تشظي بجميع الشقوق والفواصل المتدهورة بسبب شقوق المتانة (D-Cracking) أو الركام التفاعلي، فعندئذٍ سيكون عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc}) يساوي ١,٠٠. وهذا سيتفادى ازدواجية التعديل باستخدام عامل تعديل المتانة (F_{dur}) وعامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc}).



الشكل (٩–١٢) عامل تعديل الفواصل والشقوق (AASHTO, 1993) (Fjc).

يقوم عامل تعديل المتانة (F_{dur}) بالتعديل لتعويض الفقد الإضافي في مؤشر قابلية الخدمة الحالية (PSI) لطبقة التكسية عند وجود مشكلات متانة في البلاطة القائمة مثل شقوق المتانة (D-Cracking) أو عيوب ركامية تفاعلية. يُحدد عامل تعديل المتانة (F_{dur}) باستخدام بيانات مسح الحالة، وذلك وفقًا للجدول (٩-٨).

الجدول (٩–٨) عامل تعديل المتانة (Fdur) (AASHTO, 1993).

عامل تعديل المتانة (F_{dur})	حالة رصف السطح
١,٠٠	لا تظهر أي علامة على وجود مشاكل متانة في خرسانة الأسمنت البورتلاندي
٠,٩٩ - ٠,٩٦	توجد شقوق فقدان المتانة، ولكن لا يوجد أي تشظٍ
٠,٩٥ - ٠,٨٨	يوجد تشقق جوهري وبعض التشظي
٠,٨٨ - ٠,٨٠	يوجد تشقق واسع المدى وتشظٍ بالغٍ

يقوم عامل تعديل تلف الكلل (F_{fat}) بالتعديل للأخذ بالاعتبار التلف السابق الناتج عن الكلل والذي يمكن أن يكون موجودًا في البلاطة. ويُحدد من خلال مراقبة مدى انتشار الشقوق المستعرضة (الرصفيات العادية ذات الفواصل (JPCP) والرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل(JRCP)) أو تكسّر الحواف (الرصفيات الخرسانية المسلحة المستمرة التسليح) والذي يمكن أن يكون مرده الأساسي إلى التحميل المتكرر. يُحدد عامل تعديل تلف الكلل (F_{fat}) باستخدام بيانات مسح الحالة، وذلك بحسب الجدول (٩-٩).

الجدول (٩–٩) عامل تعديل تلف الكلل (Ffat) (AASHTO, 1993).

عامل تعديل تلف الكلل (F_{fat})	حالة رصف السطح
١,٠٠ - ٠,٩٧	يوجد عدد قليل من الشقوق المستعرضة/تكسر الحواف[١] رصفيات خرسانية عادية ذات فواصل: أقل من ٥٪ من البلاطات متشققة رصفيات خرسانية مسلحة ذات فواصل: أقل من ٢٥ شقوق نشطة لكل ميل رصفيات خرسانية مسلحة مستمرة: أقل من ٤ تكسر بالحواف لكل ميل
٠,٩٦ - ٠,٩٤	يوجد عدد كبير من الشقوق المستعرضة/تكسر الحواف[١] رصفيات خرسانية عادية ذات فواصل: ٥ - ١٥٪ من البلاطات متشققة رصفيات خرسانية مسلحة ذات فواصل: ٢٥ - ٧٥ شقوق نشطة لكل ميل رصفيات خرسانية مسلحة مستمرة: ٤ - ١٢ تكسر بالحواف لكل ميل
٠,٩٣ - ٠,٩٠	يوجد عدد كبير من الشقوق المستعرضة/تكسر الحواف[١] رصفيات خرسانية عادية ذات فواصل: أكبر من ١٥٪ من البلاطات متشققة رصفيات خرسانية مسلحة ذات فواصل: أكبر من ٧٥ من شقوق نشطة لكل ميل رصفيات خرسانية مسلحة مستمرة: أكبر من ١٢ تكسر بالحواف لكل ميل
١. ليست بسبب شقوق المتانة (D-Cracking) أو عيوب ركامية تفاعلية.	

٩-٧-٢-٢-٢ العمر المتبقي:

يحتسب العمر المتبقي للرصف بالمعادلة التالية:

$$RL = 100 \times \left[1 - \left(\frac{N_p}{N_{1.5}}\right)\right]$$ **المعادلة (٩-١٩)**

حيث:

RL = العمر المتبقي، ٪.

N_p = إجمالي المرور حتى الآن، مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL).

$N_{1.5}$ = إجمالي المرور حتى انهيار الرصف، مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL).

ويمكن تقدير ($N_{1.5}$) باستخدام الرسم البياني التصميمي (nomograph) في الشكل (٦-٦). يوصى بأن يكون مؤشر قابلية الخدمة الحالية (PSI) للانهيار يساوي ١,٥ والموثوقية ٥٠٪.

تُحدد السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}) من المعادلة التالية:

$$D_{eff} = CF \times D$$ **المعادلة (٩-٢٠)**

حيث:

CF = عامل الحالة المحدد من الشكل (٩-٦).

D = سماكة البلاطة القائمة.

علمًا بأن السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}) المحدد بهذه الطريقة لا يعكس أي فائدة لإصلاحات ما قبل طبقة التكسية. وبالتالي ينبغي النظر إلى القيمة التقديرية الناتجة للسماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}) باعتبارها حدًّا أدنى. وستكون السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}) أكبر في حال إصلاح طبقة التكسية المسبق للعيوب المصاحبة للحمل. ولا تنطبق طريقة تحديد قيمة السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}) هذه دون إجراء تحسين على الرصف الذي وضع عليه بالفعل طبقة تكسية واحدة أو أكثر، حتى لو كانت طبقة التكسية قد خضعت لعملية كشط أو من المقرر كشطها بالكامل.

٩-٧-٣ تصميم السماكة لطبقة تكسية من الخرسانة الأسمنتية (AC) لكل من رصفيات الخرسانة الأسمنتية/الخرسانة العادية ذات الفواصل (AC/JPCP) ورصفيات الخرسانة الأسمنتية/الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (AC/JRCP) ورصفيات الخرسانة الأسمنتية/الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (AC/CRCP):

يغطي هذا الجزء الفرعي تصميم طبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية لكل من رصفيات الخرسانة الأسمنتية/الخرسانة العادية ذات الفواصل (AC/JPCP) ورصفيات الخرسانة الأسمنتية/الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (AC/JRCP) ورصفيات الخرسانة الأسمنتية/الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (AC/CRCP). رغم أن بعض الرصفيات قد شيدت مؤخرًا مثل الخرسانة الأسمنتية/ خرسانة الأسمنت البورتلاندي (AC/PCC)، إلا أن الغالبية العظمى من رصفيات الخرسانة الأسمنتية/ خرسانة الأسمنت البورتلاندي (AC/PCC) القائمة عبارة عن رصفيات خرسانة أسمنتية/ خرسانة الأسمنت البورتلاندي (AC/PCC) وضع عليها طبقة تكسية مصنوعة من خرسانة أسمنتية مرة واحدة على الأقل.

وعند وضع طبقة تكسية لتحقيق بعض الأغراض الوظيفية كالخشونة أو الاحتكاك، فعندئذٍ يمكن الاقتصار على وضع الحد الأدنى من طبقة التكسية المطلوبة لمعالجة مشكلة الوظيفة. وفي حال وضع طبقة التكسية لأغراض التحسين الإنشائي؛ فإن السماكة المطلوبة لطبقة التكسية عبارة عن دالة في القدرة الإنشائية المطلوبة لتلبية المتطلبات المرورية في المستقبل، وكذلك القدرة الإنشائية للرصف القائم. تُحدد سماكة طبقة التكسية المطلوبة لزيادة القدرة الإنشائية للمرور المستقبلي بالمعادلة (٩-١١).

٩-٧-٣-١ تحديد سماكة البلاطة لتحمل المرور المستقبلي المرور المستقبلي (D_f):

إن المدخلات المستخدمة لتحديد (D_f) لطبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية لرصف خرسانة أسمنتية/خرسانة أسمنت بورتلاندي هي ممثلة لخواص البلاطة القائمة والأساسات. ويُؤكد ذلك نظرًا لكونها نفس خواص البلاطة القائمة (معامل المرونة ومعامل التمزق وتحويل الحمل) التي ستتحكم بأداء طبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية.

لتحديد سماكة البلاطة المطلوبة لتحمل المرور المستقبلي (D_f)، يُستخدم الرسم البياني التصميمي (nomograph) في الشكل (٦-٦). تؤخذ المعلمات التالية بعين الاعتبار:

- الموثوقية (R)، ٪ (الجزء ٦-٥).
- الانحراف المعياري الكلي (S_o) (الجزء ٦-٥).
- إجمالي عدد مرات تطبيق مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل)، (w_{18}) (الجزء ٦-٤).
- الفاقد في قابلية الخدمة (ΔPSI) (الجزء ٦-٢).
- المعامل الفعال (الساكن) لرد فعل القاعدة الترابية،)قيمة-k).
- معامل المرونة (E) لبلاطة لخرسانة الأسمنت البورتلاندي.
- تحويل حمل الفاصل (J).
- معامل التمزق (S_c').
- الفاقد في دعم البلاطة القائمة.
- قدرة الصرف تحت السطحي للبلاطة القائمة (C_d) (الجدول ٦-١). الحالة السيئة للصرف تحت السطحي تُعطى قيمة (C_d) قدرها ١,٠.

٩-٧-٣-١-١ المعامل الفعال (الساكن) لرد فعل القاعدة الترابية التصميمية، (قيمة-k):

قس أحواض انحراف البلاطات على امتداد المشروع وفقًا لما ورد في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-١). احسب الضغط الذي يحدث في طبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية أسفل لوح التحميل باستخدام المعادلات التالية:

طبقات خرسانة أسمنتية، خرسانة أسمنت بورتلاندي مترابطة:

$$d_{0\ compress} = -0.0000328 + 121.5006 \times \left(\frac{D_{ac}}{E_{ac}}\right)^{1.0798}$$ **المعادلة (٩-٢١)**

طبقات خرسانة أسمنتية، خرسانة أسمنت بورتلاندي غير مترابطة:

$$d_{0\ compress} = -0.00002133 + 38.6872 \times \left(\frac{D_{ac}}{E_{ac}}\right)^{0.94551}$$ **المعادلة (٩-٢٢)**

حيث:

$d_{o\ compress}$ = ضغط الخرسانة الأسمنتية عند مركز الحمل، بوصة.

D_{ac} = سمك الخرسانة الأسمنتية ، بوصة.

E_{AC} = معامل المرونة للخرسانة الأسمنتية، رطل لكل بوصة مربعة.

وينبغي تحديد معامل طبقة الخرسانة الأسمنتية لكل حوض انحراف. قس أحواض انحراف البلاطات على امتداد المشروع وفقًا لما ورد في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-١).

ويمكن إجراء اختبارات معملية للعينات الاسطوانية المأخوذة من سطح الخرسانة الأسمنتية في المناطق غير المتشققة لتحديد معامل المرونة لسطح الخرسانة الأسمنتية. ويمكن القيام بذلك باستخدام اختبار الشد غير المباشر متكرر الحمل (ASTM

D7369). وينبغي إجراء الاختبارات عند درجتي حرارة أو أكثر (على سبيل المثال ٤، ٢٠، ٣٠ درجة مئوية) لتحديد النقاط لمنحنى ($logE_{ac}$) مقابل درجة الحرارة. ويمكن استيفاء (interpolation) قيم معامل الخرسانة الأسمنتية عند أي درجة حرارة من القيم المعملية التي حُصِل عليها عند أي من درجتي الحرارة.

ولأغراض تفسير بيانات اختبار الانحراف غير الائتلافي (NDT)، ينبغي تعديل معامل الخرسانة الأسمنتية الذي حُصِل عليه من الاختبارات المعملية للعينات الاسطوانية بهدف مراعاة الاختلاف بين تردد التحميل لجهاز الاختبار وتردد التحميل لمقياس انحراف الثقل الساقط (FWD). ويُجرَى هذا التعديل عن طريق ضرب معامل المرونة للخرسانة الأسمنتية (E_{ac}) المحدد في المعمل في قيمة ثابتة محددة لكل من درجات حرارة الفحص المعملي. وعادةً ما تكون قيم معامل المرونة للخرسانة الأسمنتية (E_{ac}) للتردد الميداني أعلى بمقدار ٢ - ٢,٥ مرة من قيم التردد المعملية.

كما يمكن تطبيق المعادلات أعلاه لتحديد الانحراف في مركز لوح التحميل (d_0) لبلاطة خرسانة أسمنت بورتلاندي في رصف خرسانة أسمنتية/خرسانة أسمنت بورتلاندي وذلك عن طريق طرح الضغط الذي يحدث عند سطح الخرسانة الأسمنتية من قيمة (d_0) المقاسة عند سطح الخرسانة الأسمنتية. وتُحتسَب المساحة (AREA) لبلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي لكل حوض انحراف من المعادلة التالية:

$$AREA_{pcc} = 6 \times \left[1 + 2 \times \left(\frac{d_{12}}{d_{0\,pcc}}\right) + 2 \times \left(\frac{d_{24}}{d_{0\,pcc}}\right) + \left(\frac{d_{24}}{d_{0\,pcc}}\right)\right]$$

المعادلة (٩-٢٣)

حيث:

d_{0pcc} = انحراف خرسانة الأسمنت البورتلاندي في مركز لوح التحميل، بوصة (انحراف السطح (d_0) ناقصًا ضغط الخرسانة الأسمنتية ($d_{0compress}$)).

d_i = الانحرافات عند ٣٠٠ ، ٦٠٠ ، ٩٠٠ مم (١٢، ٢٤، ٣٦ بوصة) من مركز لوح التحميل، بوصة.

ادخل الشكل (٩-١٠ بقيمة انحراف خرسانة الأسمنت البورتلاندي في مركز لوحة التحميل (d_{0pcc}) والمساحة ($AREA_{pcc}$) لخرسانة الأسمنت البورتلاندي لتحديد (قيمة-k) الديناميكية الفعالة أسفل البلاطة لنصف قطر تحميل دائري يبلغ حوالي ١٥٠ مم (٥,٩ بوصة) ومقدار ٤٠ كيلو نيوتن. بالنسبة للأحمال التي تقع في حدود حوالي ٨,٩ كيلو نيوتن (٢,٠٠٠ رطل)، يمكن تكبير الانحرافات خطيًا لما يعادلها عند ٤٠ كيلو نيوتن عند تصميم سماكة طبقة تكسية واحدة لمقطع منتظم، احسب متوسط (قيمة-k) الديناميكية الفعالة للبلاطات التي خضعت للاختبار في المقطع المنتظم.

إن (قيمة-k) الساكنة الفعالة تساوي (قيمة-k) الديناميكية الفعالة مقسومة على ٢. ويمكن أن يتطلب الأمر تعديل (قيمة-k) الساكنة الفعالة للتأثيرات الموسمية باستخدام النهج المبين في الجزء الفرعي (٦-٧-١).

٩-٧-٣-١-٢ معامل المرونة (E) لبلاطة خرسانية الأسمنت البورتلاندي:

تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-٢).

٩-٧-٣-١-٣ تحويل حمل الفاصل:

تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-٣).

٩-٧-٣-١-٤ معامل التمزق (S_c') لخرسانة الأسمنت البورتلاندي:

تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-٤)، وبالنسبة لرصفيات الخرسانة الأسمنتية/الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح، فلا ينصح بتقدير معامل التمزق (Sc') من قيم معامل المرونة (E) المحسوبة عكسيًا، وذلك نظرًا لأن الشقوق غير المنعكسة في طبقة التكسية من الخرسانة الأسمنتية القائمة التي يمكن ألا تكون موجودة في رصفيات الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح داخل أحواض الانحراف.

٩-٧-٣-١-٥ فقدان دعم البلاطة القائمة:

تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-٥).

٩-٧-٣-٢ تحديد السماكة الفعالة للبلاطة القائمة: (D_{eff})

تُحتسب السماكة الفعال للبلاطة القائمة (D_{eff}) من المعادلة التالية:

المعادلة (٩-٢٤)

$$D_{eff} = \left(D_{pcc} \times F_{jc} \times F_{dur}\right) + \left[\left(\frac{D_{ac}}{2.0} \times F_{ac}\right)\right]$$

حيث:

D_{PCC} = سماكة بلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي القائمة، بوصة.

D_{ac} = سماكة سطح خرسانة الأسمنت البورتلاندي القائمة، بالبوصة.

F_{jc} = عامل تعديل الفواصل والشقوق.

F_{dur} = عامل تعديل المتانة.

F_{ac} = عامل تعديل جودة الخرسانة الأسمنتية.

يقوم عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc}) بالتعديل بخصوص الفقد الإضافي في مؤشر قابلية الخدمة الحالية (PSI) والناتج عن الشقوق الانعكاسية المتدهورة والتي ستحدث في طبقة التكسية الثانية بسبب الشقوق الانعكاسية المتدهورة التي لم تُصلَح وكذلك الانقطاعات الأخرى في رصف الخرسانة الأسمنتية/خرسانة الأسمنت البورتلاندي القائمة قبل وضع طبقة التكسية. وستنعكس الشقوق الانعكاسية المتدهورة في رصف الخرسانة الأسمنتية/خرسانة الأسمنت البورتلاندي القائمة بسرعة من خلال طبقة تكسية ثانية، مما سيسهم في فقد قابلية الخدمة؛ ولذلك من الموصى به إصلاح جميع الشقوق المتدهورة وأي انقطاعات جوهرية أخرى في الرصف القائم بكامل العمق مع إجراء إصلاحات لخرسانة الأسمنت البورتلاندي المزودة بقضبات وتدية أو المربوطة قبل طبقة التكسية، بحيث يكون عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc} = 1.00).

وإذا كان يتعذر إصلاح جميع المناطق المتدهورة، فعندئذٍ يصبح من الضروري توافر المعلومات التالية لتحديد عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc})، وذلك بهدف زيادة سماكة طبقة التكسية للأخذ في الحسبان الفقد الإضافي في مؤشر قابلية الخدمة الحالية (PSI) بسبب الشقوق الانعكاسية المتدهورة:

- عدد الشقوق الانعكاسية المتدهورة التي لم تُصلَح لكل ميل.
- عدد الأجزاء المُكسرة التي لم تُصلَح لكل ميل.
- عدد فواصل التمدّد والفواصل العريضة بشكلٍ استثنائي (أكبر من ٢٥ مم) أو رُقع الخرسانة الأسفلتية كاملة العمق وبعرض كامل المسار لكل ميل.

ويُستخدم العدد الإجمالي للشقوق الانعكاسية المتدهورة والأجزاء المكسرة والانقطاعات الأخرى التي لم تُصلَح لكل ميل بهدف تحديد عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jc}) من الشكل (٩-١٢).

يقوم عامل تعديل المتانة (F_{dur}) بالتعديل بخصوص الفقد الإضافي في مؤشر قابلية الخدمة الحالية (PSI) لطبقة التكسية عند وجود مشكلات متانة في البلاطة القائمة مثل شقوق المتانة (D-Cracking) أو عيوب ركامية تفاعلية. يُحدد عامل تعديل المتانة (F_{dur}) باستخدام السجلات التاريخية وبيانات مسح الحالة، وذلك وفقًا للجدول (٩-١٠).

الجدول (٩–١٠) عامل تعديل المتانة (Fdur) (AASHTO, 1993).

عامل تعديل المتانة (F_{dur})	حالة رصف السطح
١,٠٠	لا يوجد أي دليل أو سابقة تاريخية تشير إلى وجود مشاكل متانة في خرسانة الأسمنت البورتلاندي.
٠,٩٩ - ٠,٩٦	من المعلوم أن الرصف به مشاكل متانة لخرسانة الأسمنت البورتلاندي، ولكن لا تظهر للعيان أي عيوب محلية أو عيوب ذات صلة.
٠,٩٥ - ٠,٨٨	بعض عيوب المتانة (انهيارات موضعية وغيرها) ظاهرة للعيان على سطح الرصف
٠,٨٨ - ٠,٨٠	عيوب متانة واسعة الانتشار (انهيارات موضعية وغيرها) ظاهرة للعيان على سطح الرصف

يقوم عامل تعديل جودة الخرسانة الأسمنتية (F_{ac}) بتعديل مساهمة طبقة الخرسانة الأسمنتية القائمة في السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}) استنادًا إلى جودة مادة الخرسانة الأسمنتية. وينبغي أن تعتمد القيمة المُختارة بشكلٍ حصري على العيوب المتعلقة بطبقة الخرسانة الأسمنتية (أي ليس على الشقوق الانعكاسية) والتي تعذر التخلص منها عن طريق كشط السطح وهي: التخدد والتفكك والإزاحة، فضلاً عن التعرية الجوية وتفكك الطبقات في حالة عدم كشط الطبقة السطحية. وينبغي الأخذ في الاعتبار إزالة طبقة الخرسانة الأسمنتية رديئة الجودة بشكلٍ كامل. ويُحدَّد عامل تعديل جودة الخرسانة الأسمنتية (F_{ac}) وفقًا للجدول (٩-١١).

الجدول (٩–١١) عامل تعديل جودة الخرسانة الأسمنتية (Fac) (AASHTO, 1993).

عامل تعديل جودة الخرسانة الأسمنتية (F_{ac})	حالة رصف السطح
١,٠٠	لا توجد أي عيوب في مواد الخرسانة الأسمنتية.
٠,٩٩ - ٠,٩٦	عيوب طفيفة في مواد الخرسانة الأسمنتية (تعرية جوية، تفكك الطبقات) لم تسفر عملية كشط الطبقة السطحية عن تصحيحها.
٠,٩٥ - ٠,٨٨	توجد عيوب جوهرية في مواد الخرسانة الأسمنتية (تخدد وتعرية وإزاحة).
٠,٨٨ - ٠,٨٠	توجد عيوب جسيمة في مواد الخرسانة الأسمنتية (تخدد وتعرية وإزاحة).

٩-٧-٤ تصميم السماكة لطبقة التكسية من الخرسانة المترابطة لكل من رصفيات الخرسانة العادية (JPCP) ورصفيات الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (JRCP) الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (CRCP) :

في حال وضع طبقة التكسية لتحقيق بعض الأغراض الوظيفية كالخشونة أو الاحتكاك، فعندئذٍ يمكن الاقتصار على وضع الحد الأدنى من طبقة التكسية المطلوب لمعالجة مشكلة الوظيفة. وفي حال وضع طبقة التكسية لأغراض التحسين الإنشائي؛ فإن السماكة المطلوبة لطبقة التكسية ستكون عبارة عن دالة في القدرة الإنشائية المطلوبة لتلبية المتطلبات المرورية المستقبلية وكذلك القدرة الإنشائية للرصف القائم. تُحدد سماكة طبقة التكسية المطلوبة لزيادة القدرة الإنشائية للمرور المستقبلي من خلال المعادلة التالية.

المعادلة (٩-٢٥)

$$D_{ol} = D_f - D_{eff}$$

حيث:

D_{ol} = السماكة المطلوبة لطبقة التكسية من خرسانة الأسمنت البورتلاندي المترابط، بوصة.

D_f = سماكة البلاطة لحمل المرور المستقبلي، بوصة.

D_{eff} = السماكة الفعالة للبلاطة القائمة، بوصة.

٩-٧-٤-١ تحديد سماكة البلاطة لحمل المرور المستقبلي (D_f):

إن المدخلات المستخدمة لتحديد سماكة البلاطة لحمل المرور المستقبلي (D_f) لطبقة التكسية من خرسانة الأسمنت البورتلاندي المترابطة لرصفيات خرسانة الأسمنت البورتلاندي هي ممثلة لخواص الأساسات والبلاطة القائمة.

لتحديد سماكة البلاطة المطلوبة للمرور المستقبلي (D_f)، يُستخدم الرسم البياني التصميمي (nomograph) في الشكل (٦-٦). تؤخذ المعلمات التالية بعين الاعتبار:

- الموثوقية (R)، ٪ (الجزء ٦-٥).
- الانحراف المعياري الكلي (S_o) (الجزء ٦-٥).
- إجمالي عدد مرات تطبيق مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨,١٦ طن (١٨ ألف رطل)، (w_{18}) (الجزء ٦-٤).
- الفاقد في قابلية الخدمة (ΔPSI) (الجزء ٦-٢).
- المعامل الفعال (الساكن) لرد فعل القاعدة الترابية التصميمية، (قيمة-k).
- معامل المرونة (E) لبلاطة لخرسانة الأسمنت البورتلاندي.
- عامل تحويل حمل الفاصل (J).
- معامل التمزق (S_c').
- الفاقد في دعم البلاطة القائمة.
- قدرة الصرف تحت السطحي للبلاطة القائمة (C_d) (الجدول ٦-١). الحالة السيئة للصرف تحت السطحي تُعطى قيمة (C_d) قدرها ١,٠.

٩-٧-٤-١-١ المعامل الفعال (الساكن) لرد فعل القاعدة الترابية التصميمية، (قيمة-k):

تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-١).

٩-٧-٤-١-٢ معامل المرونة (E) لبلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي:

تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-٢).

٩-٧-٤-١-٣ تحويل حمل الفاصل:

تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-٣).

٩-٧-٤-١-٤ معامل التمزق (Sc') لخرسانة أسمنت بورتلاندي:

تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-٤).

٩-٧-٤-١-٥ فقدان دعم البلاطة الموجودة:

تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-٥).

٩-٧-٤-٢ تحديد السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}):

هنالك طريقتان لتحديد السماكة الفعالة للبلاطة القائمة هما:

١- المسح البصري واختبار المواد.

٢- العمر المتبقي.

ينبغي تطبيق كلتا الطريقتين لتحديد السماكة الفعالة (D_{eff})، ثم اختر قيمتها استنادًا إلى النتائج، وذلك باستخدام الحكم الهندسي.

٩-٧-٤-٢-١ المسح البصري واختبار المواد:

تُحسب السماكة الفعال للبلاطة القائمة من المعادلة (٩-١٨). تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-٢-١) باستثناء تحديد عامل تعديل المتانة (F_{dur}). يُحدد عامل تعديل المتانة (F_{dur}) باستخدام بيانات مسح الحالة، وذلك بحسب الجدول (٩-١٢)

الجدول (٩–١٢) عامل تعديل المتانة (Fdur) (AASHTO, 1993).

عامل تعديل المتانة (F_{dur})	حالة رصف السطح
١,٠٠	لا تظهر أي علامة على وجود مشاكل متانة في خرسانة الأسمنت البورتلاندي.
٠,٩٩ - ٠,٩٦	شقوق فقدان المتانة موجودة، ولكن لا يوجد أي تشظٍ.
٠,٩٥ - ٠,٨٠	شقوق فقدان المتانة والتشظي موجودة.

٩-٧-٤-٢-٢ العمر المتبقي:

يُحسب العمر المتبقي للرصف من خلال المعادلة (٩-١٩). تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-٢-٢).

٩-٧-٥ تصميم السماكة لطبقة التكسية غير المترابطة من رصف الخرسانة العادية ذات الفواصل (JPCP) أو رصف الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (JRCP) أو رصف الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (CRCP) لكل من رصفيات (JPCP) أو رصفيات (JRCP) أو رصفيات (CRCP) أو رصفيات الخرسانة الأسفلتية/خرسانة الأسمنت البورتلاندي (AC/PCC):

السماكة المطلوبة لطبقة التكسية غير المترابطة هي دالة في القدرة الإنشائية المطلوبة لتلبية الطلب المروري المستقبلي وكذلك القدرة الإنشائية للرصف القائم. تُحدد سماكة طبقة التكسية المطلوبة لزيادة القدرة الإنشائية للمرور المستقبلي بالمعادلة التالية.

المعادلة (٩-٢٦)

$$D_{ol} = \sqrt{D_f^2 - D_{eff}^2}$$

حيث:

D_{ol} = السماكة المطلوبة لطبقة التكسية من خرسانة الأسمنت البورتلاندي غير المترابطة، بوصة.

D_f = سماكة البلاطة لحمل المرور المستقبلي، بوصة.

D_{eff} = السماكة الفعالة للبلاطة القائمة، بوصة.

٩-٧-٥-١ تحديد سماكة البلاطة لحمل المرور المستقبلي (D_f):

يُستخدم الرسم البياني التصميمي (nomograph) في الشكل (٦-٦) لتحديد سماكة البلاطة المطلوبة؛ لحمل المرور المستقبلي (D_f). تؤخذ المعلمات التالية بعين الاعتبار:

- الموثوقية (R)، ٪ (الجزء ٦-٥).

- الانحراف المعياري الكلي (S_o) (الجزء ٦-٥).
- الإجمالي المقدر لعدد مرات تطبيق مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) بوزن ٨،١٦ طن (١٨ ألف رطل)، (w_{18}) (الجزء ٦-٤).
- الفاقد في قابلية الخدمة (ΔPSI) (الجزء ٦-٢).
- المعامل الفعال (الساكن) لرد فعل القاعدة الترابية التصميمية، (قيمة-k).
- معامل المرونة (E) لطبقة التكسية من خرسانة الأسمنت البورتلاندي غير المترابطة.
- عامل تحويل الحمل (J) لتصميم الفاصل لطبقة التكسية من خرسانة الأسمنت البورتلاندي غير المترابطة.
- معامل التمزق (S_c') لطبقة التكسية من خرسانة الأسمنت البورتلاندي غير المترابطة.
- الفاقد في دعم البلاطة القائمة.
- قدرة الصرف تحت السطحي للبلاطة القائمة (C_d) (الجدول ٦-١). الحالة السيئة للصرف تحت السطحي تُعطى قيمة (C_d) قدرها ١،٠.

٩-٧-٥-١-١ المعامل الفعال (الساكن) لرد فعل القاعدة الترابية التصميمية، (قيمة-k):

تنطبق الطريقة الموضحة في القسم الفرعي (٩-٧-٢-١-١).

٩-٧-٥-١-٢ عامل تحويل الحمل (J) لتصميم الفاصل لطبقة التكسية *من خرسانة* الأسمنت البورتلاندي غير المترابطة:

انظر الجزء الفرعي (٦-٨-١)، الجدول (٦-٢).

٩-٧-٥-١-٣ معامل التمزق لطبقة التكسية من خرسانة الأسمنت البورتلاندي غير المترابطة:

انظر القسم الفرعي (٦-٧-٣-١-٢).

٩-٧-٥-١-٤ معامل المرونة لطبقة التكسية من خرسانة الأسمنت البورتلاندي غير المترابطة:

انظر القسم الفرعي (٦-٧-٣-١-١).

٩-٧-٥-١-٥ فقدان الدعم:

تُستخدم القيمة (LS = 0) لفقدان الدعم بالنسبة لطبقة التكسية من خرسانة الأسمنت البورتلاندي غير المترابطة.

٩-٧-٥-٢ تحديد السماكة الفعالة للبلاطة القائمة (D_{eff}):

٩-٧-٥-٢-١ مسح الحالة:

تحسب السماكة الفعالة لخرسانة الأسمنت البورتلاندي (PCC) أو رصف الخرسانة الأسفلتية/خرسانة الأسمنت البورتلاندي (AC/PCC) من المعادلة التالية:

المعادلة (٩-٢٧)

$$D_{eff} = F_{jcu} \times D$$

حيث:

D = سماكة بلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي القائمة، بوصة (ويبلغ الحد الأقصى للسماكة الممكن استخدامها في تصميم طبقة التكسية من الخرسانة غير المترابطة ٢٥٤ مم حتى إذا كانت السماكة القائمة أكبر من ذلك).

F_{jcu} = عامل تعديل الفواصل والشقوق لطبقة التكسية الخرسانية غير المترابطة.

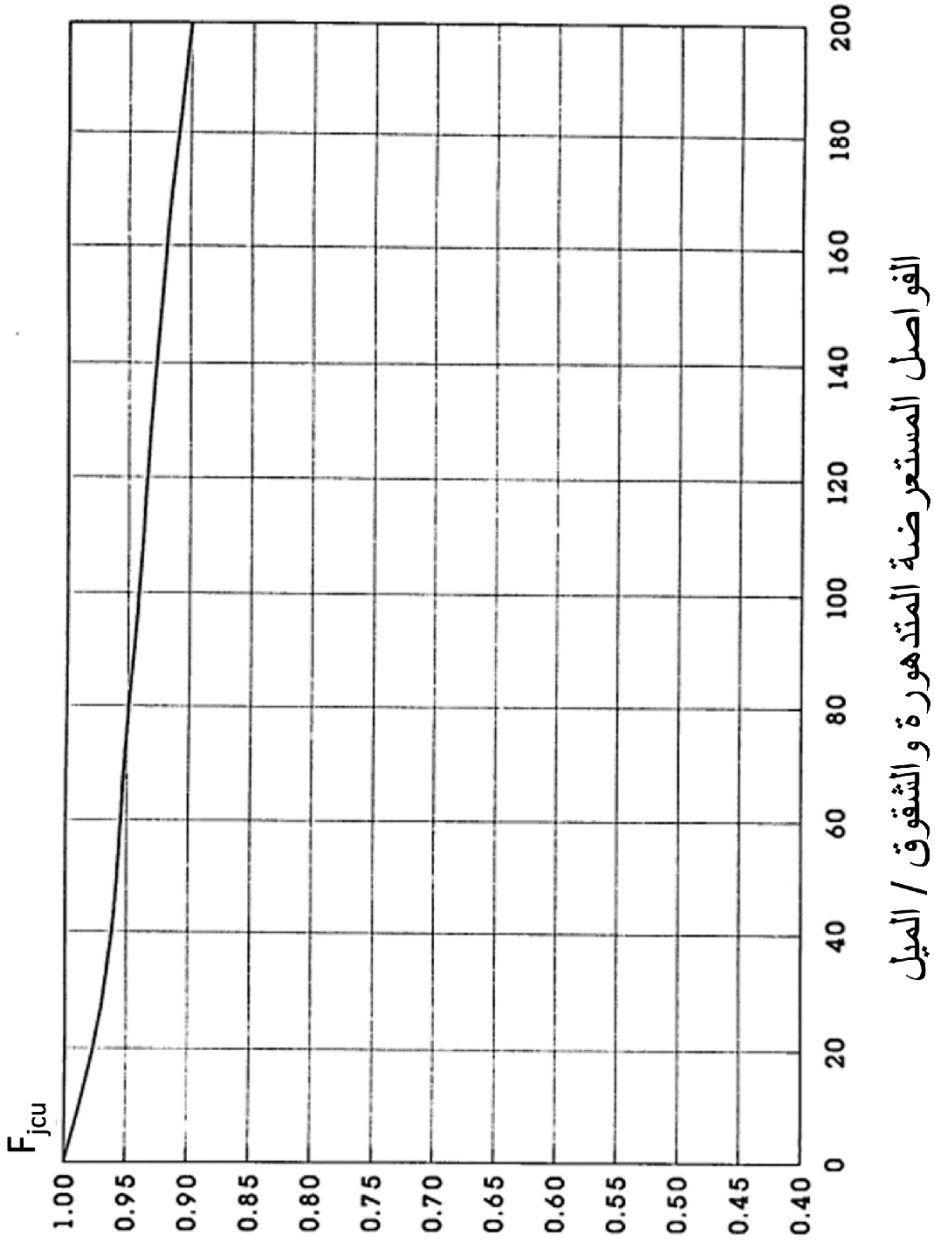
تُهمَل طبقة الخرسانة الأسفلتية (AC) السطحية القائمة عند تحديد سماكة البلاطة الفعالة للرصف القائم من الخرسانة الأسفلتية/خرسانة الأسمنت البورتلاندي (AC/PCC).

يقوم عامل تعديل الفواصل والشقوق بالتعديل بالنسبة للفقد الإضافي في مؤشر قابلية الخدمة الحالية (PSI) والناتج عن الشقوق الانعكاسية المتدهورة أو تكسر الحواف في طبقة التكسية التي حدثت بسبب الفواصل والشقوق المتدهورة التي لم تُصلَح وكذلك الانقطاعات الأخرى في البلاطة القائمة قبل طبقة التكسية. وقد لوحظ قدر ضئيل للغاية من هذا الفقد في مؤشر قابلية الخدمة الحالية (PSI) بالنسبة لطبقة التكسية غير المترابطة لرصفيات الخرسانة العادية ذات الفواصل (JPCP) أو رصفيات الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (JPCP).

ويلزم توافر المعلومات التالية لتحديد عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jcu}) لتعديل سماكة طبقة التكسية الخرسانية بالنسبة للفقد الإضافي في مؤشر قابلية الخدمة الحالية (PSI) بسبب الشقوق الانعكاسية المتدهورة التي لم تُصلَح:

- عدد الفواصل المتدهورة التي لم تُصلَح/ ميل.
- عدد الشقوق المتدهورة التي لم تُصلَّح/ ميل.
- عدد فواصل التمدّد والفواصل العريضة بشكلٍ استثنائي (أكبر من ٢٥,٤ مم) أو رُقع الخرسانة الأسفلتية كاملة العمق وبعرض كامل المسار لكل ميل.

يُستخدم العدد الإجمالي للفواصل والشقوق المتدهورة التي لم تُصلَّح وغيرها من الانقطاعات لكل ميل قبل طبقة التكسية لتحديد عامل تعديل الفواصل والشقوق (F_{jcu}) من الشكل (٩-١٣)؛ لمعرفة النوع المناسب من طبقة التكسية من خرسانة الأسمنت البورتلاندي. وكبديل للإصلاح الشامل كامل العمق لطبقة التكسية غير المترابطة والمقرر وضعها على رصف حالته متدهورة للغاية، فإن استخدام طبقة بينية أكثر سمكًا من خرسانة الأسمنت البورتلاندي من شأنه القضاء على أي مشكلة تشقق انعكاسي، بحيث يصبح عامل تعديل الفواصل والشقوق لطبقة التكسية الخرسانية غير المترابطة (F_{jcu}) = ١,٠.



الشكل (٩–١٣) عامل تعديل الفواصل والشقوق لطبقة التكسية الخرسانية غير المترابطة (Fjcu) لكل من رصف الخرسانة العادية ذات الفواصل (JPCP) ورصف الخرسانة المسلحة ذات الفواصل (JRCP) ورصف الخرسانة المسلحة المستمرة التسليح (CRCP) (AASHTO, 1993).

٩-٧-٥-٢-٢ العمر المتبقي:

يحسب العمر المتبقي للرصف بالمعادلة (٩-١٩). تُحدد السماكة الفعالة للبلاطة القائمة وفق المعادلة (٩-٢٠) ويحسب عامل الحالة من الشكل (٩-٦). وتُحدد قيمة الحد الأقصى لسماكة البلاطة القائمة في تصميم طبقة التكسية الخرسانية غير المترابطة بمقدار ٢٥٤ مم حتى إذا كانت السماكة القائمة أكبر من ذلك.

١٠ـ الممارسات الناشئة والرصفيات المستدامة:

١٠-١ الرصفيات الدائمة:

الرصف الدائم (طويل العمر) عبارة عن مقطع رصف أسفلتي فائق السماكة وكامل العمق مُصمَّم بطبقات متعددة وخلطات محددة بحيث تكون مقاومة للتخدد والتشقق الناتج عن الكلل. يتكون نظام الرصف الدائم من كل من طبقة أساس بمحتوى أسفلتي مرتفع بهدف إضفاء المرونة التي تجعله مقاومًا للتشقق الناتج عن الكلل، وطبقة وسيطة واحدة أو أكثر مُصمَّمة لتحقيق ثبات عالٍ ومقاومة للتخدد، وطبقة سطحية عالية الأداء. إن الرصفيات المرنة السميكة المُشيَّدة بشكلٍ جيد والمُزودة بطبقات أساس أسفلتية ترتكز إلى قواعد متينة لن يصيبها أي تشوّه إنشائي أو أي تشقق في طبقة الأساس من أسفل لأعلى نتيجة الكلل. ويُصمم مقطع الرصف بحيث يصل عمر الخدمة إلى خمسين عامًا؛ بحيث تقتصر إعادة التأهيل -فقط- على استبدال الطبقة السطحية المستهلكة بسبب التآكل والاهتراء الطبيعي. من الممكن أن تتسبب العوامل البيئية والأحمال المرورية المتكررة في حدوث تشققات في الطبقة السطحية التي يحتمل أن يزداد عمقها. ويقتصر حدوث تخدد في هذه الرصفيات على الطبقات السطحية فقط (أي أنها غير إنشائية).

١٠-١-١ طبقة الأساس الأسفلتية:

يجب أن تكون طبقة الأساس الأسفلتية مقاومة للنزوع إلى تشققات الكلل؛ بسبب الانحناء تحت الأحمال المرورية المتكررة. ويعد تصميم خلطة يحتوي على محتوى أسفلتي أعلى بمثابة إحدى استراتيجيات تصميم الخلطة التي من شأنها المساعدة في اتقاء تشققات الكلل، وهو ما يُحقِّق غايتين مهمتين. الأولى أن زيادة محتوى الأسفلت يسمح بدمك المواد للحصول على كثافة أعلى، مما يؤدي إلى تعزيز متانتها وجعلها مقاومة للكلل. والغاية الثانية أن اشتمالها على أسفلت إضافي، ولكن إلى حد معين، يُحقق المرونة اللازمة لمنع تكوُّن وازدياد تشققات الكلل. وعند اقتران ذلك بالسماكة الإجمالية المناسبة للأسفلت، فإن هذا يساعد على ضمان عدم تعرض القاعدة الترابية لتشققات الكلل. وينبغي تعريف محتوى الأسفلت في طبقة الأساس على أنه المحتوى الذي يُنتِج فراغات هوائية منخفضة في المكان. وهذا يكفل توافر حجم أكبر من المادة الرابطة في فراغات الركام المعدني، وهو أمر بالغ الأهمية للمتانة والمرونة. وثمة نهج آخر؛ لضمان عمر الكلل ألا وهو تصميم سماكة لهيكل إنشائي صلب بحيث يُقلَّص إجهاد الشد في قاع طبقات الأسفلت إلى الحد الذي لا يتسبب في حدوث أي تلفيات تراكمية. وهذا من شأنه أن يسمح باستخدام تصميم أحادي الخلطة في طبقة الأساس والطبقات الوسيطة؛ لتنتفي بذلك الحاجة إلى تبديل أنواع الخلطة في الهيكل الإنشائي السفلي للرصف.

١٠-١-٢ الطبقة الوسيطة:

يجب أن تجمع الطبقة الوسيطة أو الرابطة بين صفات الثبات والمتانة. ويمكن الحصول على الثبات في هذه الطبقة ثابتة من خلال تحقيق تلامس الحجر فوق الحجر في الركام الخشن واستخدام مادة رابطة ذات تصنيف مناسب لمقاومات درجات الحرارة العالية. وتزداد أهمية ذلك بشكلٍ خاص في أعلى ١٠٠ مم (٤ بوصة) من الرصف؛ إذ أن الإجهادات العالية لأحمال المركبات قد تتسبب في إحداث تخدد من خلال انهيار القص. كما أن الاحتكاك الداخلي الذي يوفره الركام يمكن أن يتحقق باستخدام حصى أو حجر مُكسر مع الحرص على تشكيل هيكل ركامي. ولعل أحد الخيارات لتنفيذ ذلك هو استخدام مقاس اسمي أقصى كبير للركام، والذي يمكن أن يقلل التكلفة بسبب انخفاض محتوى الأسفلت. بالنسبة للخلطات المستخدمة مع المقاس الاسمي الأقصى للركام بما يصل إلى ٣٧,٥ مم؛ فيمكن استخدام نهج سوبربيف لتصميم الخلطة. غير أنه من الجدير بالذكر أن المقاس الاسمي الأقصى الكبير للركام قد يتسبب في حدوث انفصال حبيبي وتشكل فراغات هوائية أعلى من المستوى الموصى به؛ الأمر الذي قد يسفر عن تسرب المياه. وسيكون من الحكمة في مثل هذه الحالات طلب محتوى هوائي أقل في تصميم الخلطة، وضمان وجود مستوى عالٍ من الدمك في الموقع. كما يُستخدم نظام مواد رابطة يُعطى درجة أداء (PG) لتصنيف المادة الرابطة الأسفلتية تبعًا لدرجات حرارة الخدمة العالية والمنخفضة. وينبغي أن تكون درجة الحرارة العالية للأسفلت مماثلة لدرجة الطبقة السطحية وذلك لمقاومة التخدد. غير أنه من الممكن تخفيف متطلبات درجة الحرارة المنخفضة بمقدار درجة واحدة؛ نظرًا لأن التدرج الحراري في الرصف شديد الانحدار نسبيًا، ومن ثم فإن درجة الحرارة المنخفضة في هذه الطبقة لن تكون بنفس شدتها في الطبقة السطحية. وينبغي أن يكون تصميم الخلطة عبارة عن نهج سوبربيف قياسي ينطوي على عملية لاختيار المواد وتحديد مستوى الفراغات الهوائية التصميمية الذي سيوفر الحماية من الانفصال الحبيبي والنفاذية. وينبغي أن يشمل اختبار الأداء على اختبار التخدد واختبار الشقوق والقابلية للرطوبة، على أقل تقدير.

١٠-١-٣ الطبقة السطحية:

تعتمد متطلبات الطبقة السطحية على كل من الأحوال المرورية، وظروف البيئة، والخبرة المحلية، والاقتصاد. وتشمل متطلبات الأداء كل من مقاومة التخدد والتشققات السطحية، والاحتكاك الجيد، وتخفيف تناثر الرذاذ والرش، وتقليل الضوضاء الناتجة عن احتكاك الإطارات بالرصف. وقد تفضي هذه الاعتبارات إلى اختيار خلطة حجرية بمعجون الإسفلت (SMA). حيث إن هذا النوع من الأسفلت، المصمم والمصنوع بشكلٍ صحيح، سيوفر هيكلًا حجريًا لقدر حمل الأحمال الأساسية، كما أن معجون الإسفلت (خليط

من مادة رابطة ومادة مالئة) ستضفي مزيدًا من الصلابة إلى الخلطة. ويمكن الحصول على معجون الإسفلت في الخلطة الحجرية بمعجون الأسفلت باستخدام الأسفلت المعدل بالبوليمر مع تزويده بألياف أو بالاقتران مع مواد معدنية مالئة محددة.

١٠-١-٤ تصميم الرصف الدائم:

يمكن اعتبار طريقة التصميم الإنشائي للرصف الدائم باعتبارها مجموعة فرعية من النهج الميكانيكي-التجريبي الموضح في الجزء (٥-٣) مع تعديلين ملحوظين. ويتمثل الاختلاف الرئيس الأول في حدود التحمل في مكوّن التنبؤ بالأداء التجريبي. وتعرف حدود التحمل بأنها قيم استجابة الرصف لمواد محددة وعيوب محددة التي لن تتراكم أي تلفيات في حالة عدم تجاوزها. بالنسبة لاستجابة الشد في الجزء السفلي من الأساس الأسفلتي؛ فإن حد التحمل يتوافق مع تشقق الكلل من أسفل لأعلى في الخرسانة الأسفلتية. أما بالنسبة للاستجابة في الجزء العلوي من القاعدة الترابية؛ فإن حد التحمل يتوافق مع تنبؤات التخدد الإنشائية التي أجريت مع الانفعال في القاعدة الترابية. إن الأحمال المرورية التي تستثير استجابات الرصف تحت أي من حدي التحمل لن تساهم في إحداث تراكم الأضرار بالرصف، مما يؤدي إلى تنبؤ لانهائي بعمر الأداء. وطبقًا لهذا الإطار فإن الهدف من تصميم الرصف الدائم يتمثل في تصميم سماكة الرصف بحيث تستثير معظم الأحمال المرورية المطبقة استجابات الرصف عند مستويات أقل من العتبات المقابلة. بينما يتمثل الاختلاف الرئيس الثاني في حتمية أن تكون التلفيات أدنى بكثير من ١,٠ عن "قاعدة مينر" ("Miner's rule"). وذلك نظرًا لأن بلوغ المستوى ١,٠ يعني انهيار الرصف في نمط معين، ومن ثم ينبغي تصميم الرصف الدائم بحيث تكون التلفيات أقل بكثير من ١,٠، أو حتى يكاد يقترب من ٠.

ويُعَد تحديد حد التحمل أمرًا بالغ الأهمية لنجاح تصميم الرصف الدائم. ويتراوح حد التحمل لإجهاد الشد عند الجزء السفلي من طبقات خلطة الأسفلت الساخن من ٧٠ إلى ١٠٠ ميكرومتر (Texas Department of Transportation, 2021; NAPA, 2020; Thompson & Carpenter, 2006). وينبغي أن يكون انفعال الضغط العمودي في القاعدة الترابية أقل من ٢٠٠ ميكرومتر (NAPA, 2020).

يحظى البرنامج الحاسوبي AASHTOWare بالقدرة على إدراج حدود تحمل الكلل. علمًا بأن تمكين خاصية حد التحمل، وتحديد عتبة التصميم الفردي سيؤدي إلى وضع حد أدنى لوظيفة تحويل الكلل. لن ينتج ثمة تلفيات عن أي قيم انفعال أدنى من حد التحمل بينما ستستخدم قيم الانفعال التي تتجاوز حد التحمل في وظيفة تحويل تشقق الكلل و"فرضية مينر"، "Miner's hypothesis"؛ لحساب مقدار التلفيات. ومن الناحية المثالية، ينبغي أن يستهدف المصمم انعدام (٠٪) وجود تشقق كلل لتحقيق رصف دائم في ظل هذه الظروف. لا توجد أي مدخلات أو إعدادات بشأن التخدد الإنشائي. ومع ذلك، يستطيع المصمم تحقيق رصف دائم في هذا الإطار عن طريق تعظيم المواد والسمك.

١٠-٢ خلطة أسفلتية معاد تدويرها:

إن إعادة تدوير رصف الأسفلت يوجد دورة لإعادة استخدام المواد مما يحقق التوظيف الأمثل للموارد الطبيعية. يعد رصف الأسفلت المستصلح (RAP) بديلاً مفيدًا للمواد الخام نظرًا؛ لأنه يقلص الحاجة إلى استخدام ركام جديد.

تظل العملية الكلية لتصميم خلطات رصف الأسفلت المستصلح مماثلة لتلك المتبعة في تصميم خلطة الأسفلت الساخن الخام إما بطريقة سوبربيف لتصميم الخلطة الأسفلتية (الجزء الفرعي ٣-٦-٢) أو بطريقة مارشال لتصميم خلطة (الجزء الفرعي ٣-٦-١) ويجب أن يكون متوافقًا مع متطلبات (AASHTO M323) و (AASHTO R35). غير أن الأمر يستلزم اعتماد إجراءات إضافية لاستيعاب استخدام رصف الأسفلت المستصلح.

١٠-٢-١ محتوى وخواص المادة الرابطة في رصف الأسفلت المستصلح:

إن المحتوى الكلي للمادة الرابطة الناتجة من الخلط على الساخن تتكون من مادة رابطة خام وكذلك مادة رابطة لرصف الأسفلت المستصلح التي يحتويها رصف الأسفلت المستصلح. ومن الأهمية بمكان معرفة مقدار المادة الرابطة الأسفلتية الموجودة في مادة رصف الأسفلت المستصلح؛ بحيث يتسنى أخذها في الحسبان في عملية تصميم الخلطة. حدد محتوى المادة الرابطة بكل عينة من عينات رصف الأسفلت المستصلح باستخدام طريقة الاستخراج. ويكون من الضروري في بعض الأحيان -أيضًا- معرفة بعض الأمور عن الخواص الطبيعية للمادة الرابطة الأسفلتية. وفي مثل هذه الحالات، من الضروري استخراج واستعادة المادة الرابطة الأسفلتية من رصف الأسفلت المستصلح باستخدام مُذيب؛ بحيث يتسنى اختبار المادة الرابطة.

ويمكن أن تحتاج درجة المادة الرابطة المحددة إلى تعديل، وذلك نظرًا لتأثير التقسية للمادة الرابطة القديمة الموجودة في رصف الأسفلت المستصلح. إن تحديد التعديل المطلوب على درجة المادة الرابطة الموجودة في خلطات الأسفلت الساخن والتي يُدرج فيها رصف أسفلت مستصلح إلى ثلاثة مستويات؛ حيث يحتوي كل مستوى على مدى من النسب المئوية التي تُمثل مساهمة رصف الأسفلت المستصلح في مجمل الخلطة بالوزن (الجدول ١٠-١).

الجدول (١٠–١) المبادئ التوجيهية لاختيار المادة الرابطة في خلطات رصف الأسفلت المستصلح.

المحتوى الموصي به من المادة الرابطة الأسفلتية الخام	النسبة المئوية لرصف الأسفلت المستصلح
دون تغيير في اختيار المادة الرابطة	أقل من ١٥
اختيار مادة رابطة خام تكون أكثر ليونة من المعتاد بدرجة واحدة فقط (على سبيل المثال: اختيار PG 58-28 إذا كان الطبيعي هو استخدام PG 64-22)	١٥ ـ ٢٥
اتباع التوصيات الواردة في مخططات المزج	أكبر من ٢٥

١٠-٢-٢ مخططات بيانية للمزج:

يمكن تنفيذ عملية مزج المواد الرابطة الموجودة برصف الأسفلت المستصلح عن طريق معرفة الدرجة النهائية المنشودة (درجة الحرارة الحرجة) للمادة الرابطة المخلوطة، وكذلك الخواص الطبيعية (ودرجات الحرارة الحرجة) للمادة الرابطة المستخلصة من رصف الأسفلت المستصلح، وأي من الخواص الطبيعية (ودرجات الحرارة الحرجة) للمادة الرابطة الأسفلتية الخام أو النسبة المئوية المرغوب بها من رصف الأسفلت المستصلح في الخلطة؛ فقد ورد وصف هذه الطريقة في (AASHTO M323).

١٠-٢-٣ خواص ركام رصف الأسفلت المستصلح:

يجب أن يستوفي ركام رصف الأسفلت المستصلح المتطلبات المنطبقة على الركام الخام. كما يلزم تحليل ركام رصف الأسفلت المستصلح؛ لتحديد كل من مستوى تدرجه وثقله النوعي وخواص الإجماع التي تميزه. ونظرًا لأنه يتعذر حساب الثقل النوعي لركام رصف الأسفلت المستصلح بشكلٍ مباشر؛ فمن الضروري تقديره على النحو التالي:

- تستخدم الطريقة ١ الركام المستخرج وتفصله إلى أجزاء خشنة وأخرى ناعمة، ومن ثم تحديد الثقل النوعي لكل منها على حده.
- تستخدم الطريقة ٢ الثقل النوعي الفعال لركام رصف الأسفلت المستصلح ($G_{se(RAP,Agg)}$) بدلاً من الثقل النوعي الكتلي ($G_{sb(RAP,Agg)}$)؛ وذلك استنادًا إلى الحد الأقصى للثقل النوعي النظري لخلطة رصف الأسفلت المستصلح ($G_{mm(RAP)}$) ونسبة المادة الرابطة الأسفلتية في رصف الأسفلت المستصلح ($P_{b(RAP)}$).
- تستخدم الطريقة ٣ نفس المنهجية المستخدمة في الطريقة ٢ باستثناء أن امتصاص ركام رصف الأسفلت المستصلح ($P_{ba(RAP,agg)}$) يكون مفترضًا، والثقل النوعي الكتلي ($G_{sb(RAP,Agg)}$) يكون محسوبًا.

١٠-٢-٤ صياغة العينة:

يوضح هذا الجزء الفرعي طريقة الخلط ودمك عينات اختبار الخلطة المعاد تدويرها وفقًا للمواصفتين (AASHTO T312) و (AASHTO R30).

١٠-٢-٤-١ تحضير الركام ورصف الأسفلت المستصلح:

احصل على عينات ممثلة من الركام ورصف الأسفلت المستصلح وفقًا لمواصفة (AASHTO R90). يُتعامل مع ركام رصف الأسفلت المستصلح مثل أي مخزون آخر فيما يتعلق بعمليتي الخلط والوزن. يلزم تسخين رصف الأسفلت المستصلح؛ بحيث يصبح قابل للتشكيل ثم يُخلَط مع المواد الخام. تجنب تسخين رصف الأسفلت المستصلح أكثر من مرة واحدة. كما يجب استخدام عينة رصف الأسفلت المستصلح في غضون ساعة واحدة من تسخينها إلى درجة الحرارة اللازمة للخلط. ويستحسن فصل رصف الأسفلت المستصلح إلى أجزاء خشنة وناعمة باستخدام المنخل ٤,٧٥ مم.

١٠-٢-٤-٢ خلط ودمك العينات:

تظل العملية كما هي في تصميم خلطة الأسمنت الساخن الخام، باستثناء ما يلي:

- لا تقم باستخراج المادة الرابطة لرصف الأسفلت المستصلح من ركام رصف الأسفلت المستصلح.
- أضف رصف الأسفلت المستصلح كمكون ركامي أخير قبل إضافة المادة الرابطة الخام.
- من المهم تذكر أن المادة الرابطة تُشكِّل جزءًا من وزن رصف الأسفلت المستصلح، ويجب تقليل محتوى الأسفلت الكلي لتعويض المادة الرابطة التي يوفرها رصف الأسفلت المستصلح.
- عند خلط رصف الأسفلت المستصلح، سيشتمل وزنه على كلٍ من الركام والمادة الرابطة. كما أنه من الضروري زيادة وزن رصف الأسفلت المستصلح، وتقليص كمية المادة الرابطة الجديدة المُضافة؛ وذلك لكي يؤخذ في الحسبان وجود المادة الرابطة برصف الأسفلت المستصلح. ويحسب وزن رصف الأسفلت المستصلح الجاف الذي يوفر وزنًا معينًا لركام رصف الأسفلت المستصلح من المعادلة (١٠-١):

المعادلة (١٠-١)

$$M_{dryRAP} = \frac{M_{RAPagg}}{100 - P_{b(RAP)}} \times 100$$

حيث:

M_{dryRAP} = كتلة رصف الأسفلت المستصلح الجاف (جرام).

M_{RAPagg} = كتلة ركام رصف الأسفلت المستصلح (جرام).

$P_{b\ (RAP)}$ = محتوى المادة الرابطة برصف الأسفلت المستصلح (٪).

١٠-٣ خلطة الأسفلت الدافئ (WMA):

خلطة الأسفلت الدافئ (WMA) هو المصطلح العام لطائفة متنوعة من التقنيات التي تسمح لمنتجي مواد رصف خلطة الأسفلت الساخن بخفض درجات الحرارة (٢٨ درجة مئوية أو أكثر) والتي تُخلَط عندها المواد قبل أن توضع على الطريق. ويتمثل الهدف من خلطة الأسفلت الدافئ في إنتاج خلطات تماثل خلطة الأسفلت الساخن من حيث القوة والمتانة وخصائص أداء، وذلك باستخدام درجات حرارة إنتاجية منخفضة بشكلٍ جوهري.

وتعمل تقنيات خلطة الأسفلت الدافئ على خفض لزوجة المادة الرابطة الأسفلتية بحيث يتسنى وضع طبقة الركام الأسفلتية عند درجات حرارة منخفضة. وتتمثل الفكرة الرئيسة في إلحاق مُضافات (مائية أو عضوية أو كيميائية أو هجينة) إلى خلطة الأسفلت. وتسمح هذه المُضافات بخلط المواد الرابطة الأسفلتية مع ركام الأسفلت عند درجات حرارة أقل. كما أن خفض اللزوجة يؤدي أيضًا إلى تسهيل معالجة الخلطة ودمكها عند درجة الحرارة الأقل.

ويتبع تصميم خلطة الأسفلت الدافئ نفس الطريقة المتبعة في خلطة الأسفلت الساخن (الجزء الفرعي ٣-٦-٢) ووفقًا للمواصفة (AASHTO R35). استخدم نفس درجة المادة الرابطة المستخدمة مع خلطة الأسفلت الساخن، وذلك تبعًا للظروف البيئية والمرورية بموقع المشروع. أما بالنسبة لتقنيات خلطة الأسفلت الدافئ التي تبلغ درجات حرارة إنتاجها ٥٦ درجة مئوية أو أكثر، وهي درجة أقل من درجات حرارة إنتاج خلطة الأسفلت الساخن، فيمكن أن يكون من الضروري زيادة درجة الأداء الحراري المرتفعة للمادة الرابطة بمقدار درجة واحدة بهدف استيفاء متطلبات مقاومة التخدد.

وينبغي أن تكون الخلطة المصممة مستوفية لمتطلبات حساسية الرطوبة وفقًا للمواصفة (AASHTO T283). إن معايير حساسية الرطوبة الموصى بها هي أن تكون نسبة مقاومة الشد أكبر من ٠,٨٠ ودون أي دليل مرئي على وجود تعرية.

وتُقيَّم مقاومة التخدد باستخدام اختبار رقم التدفق وفقًا للمواصفة (AASHTO T387). الحد الأدنى لمتطلبات رقم التدفق مذكور في الجدول (١٠-٢).

الجدول (١٠–٢) الحد الأدنى لمتطلبات رقم التدفق.

مستوى المرور (مليون من مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد، ESAL)	الحد الأدنى لرقم التدفق
أقل من ٣	لا يوجد
٣ - ١٠	٣٠
١٠ - ٣٠	١٠٥
أكبر من أو يساوي ٣٠	٤١٥

١٠-٤ الخلطات الأسفلتية الباردة:

تُعدّ خلطة الأسفلت البارد أكثر نفعًا للإصلاحات مثل الشقوق والحفر الصغيرة أو الرقع. خلطة الأسفلت البارد ليست بنفس قوة خلطة الأسفلت الساخن، وينبغي أن يقتصر استخدامها على تنفيذ الإصلاحات صغيرة الحجم فقط أو الرقع المؤقتة لحين توافر الإمكانية لإجراء إصلاح دائم باستخدام خلطة الأسفلت الساخن. ينبغي أن يكون الركام والمادة المالئة المعدنية والأسفلت وتكوين خلطات الأسفلت مطابقة للمواصفة (ASTM D4215).

١٠-٥ الرصفيات المخفضة للضوضاء:

تُستخدم الخلطة الحجرية بمعجون الإسفلت (SMA)؛ لتصميم وإنشاء الرصف بهدف خفض الضوضاء الناتجة عن احتكاك الإطارات بالرصف. وهو عبارة عن خلطة أسفلت ساخن ناقص التدرج مُعد خصيصًا لزيادة المتانة ومقاومة التخدد لأقصى حد. والغاية من تصميم الخلطة هي تكوين تلامس الحجر فوق الحجر ضمن الخلطة. ونظرًا لأن الركام لا يتعرض للتشوُّه بالقدر الذي يحدث في المادة الرابطة الأسفلتية تحت الأحمال، فإن تلامس الحجر فوق الحجر يعمل على تقليل التخدد بشكل كبير. وتعد الخلطة الحجرية بمعجون الإسفلت -عمومًا- أكثر تكلفة من خلطة الأسفلت الساخن النموذجية كثيفة التدرج، وذلك نظرًا لأنها تتطلب ركامًا أكثر متانة ومحتوى أعلى من الأسفلت والألياف ومادة رابطة أسفلتية مُعدلة. وهي تتسم بالفعالية من حيث التكلفة عند استخدامها في الحالات المناسبة، وذلك بفضل مقاومتها المتزايدة للتخدد ومتانتها المُحسّنة. ويساعد الملمس السطحي الخشن لهذه الرصفيات على خفض ضوضاء الرصف. ويجب أن يكون استخدام الخلطة الحجرية بمعجون الإسفلت متوافقًا مع متطلبات الجزء (٥-٧) من كود الطرق السعودي ٤٠١ (إنشاء الطرق) .

١٠-٦ المركبات ذاتية القيادة وتصميم الرصف:

تؤثر المركبات ذاتية القيادة بشكل مباشر على سلوك أصول البنية التحتية للطرق وعلى تصميم الرصف بشكل أكثر تحديدًا. وينطبق هذا بشكل خاص على مرور الشاحنات الذي يعد عاملًا مهمًّا يستخدم كمساهم في عمليات تصميم الرصف الجديدة. ومن المتوقع أن يكون للشاحنات ذاتية القيادة سلوك قيادة مختلف مقارنة بالمركبات الحالية التي يقودها الإنسان، من حيث اختيار المسار والتوزيع الجانبي داخل المسار، والذي يُعرف باسم تمايل (ترنّح) العجلات. فالمركبات التي يقودها الإنسان تميل إلى توزيع مسارات العجلات بشكل عرضي عبر مسار المرور باتباع نمط توزيع تكراري. ويمكن التقاط تمايل عجلات المركبات التي يقودها الإنسان تقريبًا عن طريق التوزيع الطبيعي حول خط الوسط للمسار بمتوسط صفر وانحراف معياري معروف. وعلى العكس من ذلك، تُبرمج الشاحنات ذاتية القيادة لإبقاء موضعها العرضي بالقرب من خط الوسط، مما يؤدي إلى ما يقرب من صفر تمايل العجلات. ومن حيث عيوب الرصف، يمكن أن يرتبط ذلك بتركيز حمولة زائدة داخل مسار ضيق للعجلات بسبب الطبيعة القنواتية لحركة المرور. ومن ثم، ستكون الأحمال المرورية المُستحثة أكبر، مما يؤثر بشكل مباشر على استجابات الرصف وسلوكها وأدائها ويؤدي حتمًا إلى تراكم متسارع للأضرار على المدى الطويل. من المتوقع أن يزداد التخدد في الرصف المرن بشكل كبير، بينما يُسرَّع التكسير الناتج عن الكلل.

ويبدو أن بعض الإجراءات المتوقعة تشمل الخلطات المتينة المقاومة للتخدد والخلطات المتينة بالنسبة للتشقق والرصفيات السميكة، والتي يمكن أن تعكس اتجاه الآثار السلبية للشاحنات ذاتية القيادة على الرصفيات، ولكنها تزيد أيضًا من التكاليف ذات الصلة. غير أن الشاحنات ذاتية القيادة تمنح القدرة على تتبع الوضعية العرضية المرغوبة وتتحكم فيها تلقائيًا. وعلى هذا النحو، يمكن برمجتها لتتبع نفس توزيع المركبات غير ذاتية القيادة والتي يقودها الإنسان (أي العادية)، وبالتالي الحفاظ على ظروف التحميل الحالية. بالإضافة

إلى ذلك، يمكن أن يؤدي التوزيع المنتظم لتمايل العجلات في الشاحنات ذاتية القيادة إلى تحسين أداء الرصف، من حيث تشقق الكلل والتخدد، وبالتالي، إلى إطالة عمر تصميم الرصف.

وبالتالي، بمجرد توحيد تقنية التحكم في الوضعية العرضية، يمكن أن يكون من الأكثر كفاءة التحكم في الحركة العرضية للمركبات ذاتية القيادة واعتماد إرشادات للتوزيع الأمثل لتمايل العجلات.

على أي حال، من المهم أخذ تأثير تمايل العجلات في الاعتبار عند تصميم الرصفيات. ولقد طور عدد محدود من الدراسات مناهج تحليلية لأخذ تمايل العجلات في الاعتبار عند تصميم الرصفيات (Gungor et at., 2018). أحد هذه المنهجيات طور من قبل (NCHRP 2004)، والذي يحسب متوسط الأضرار المتوقعة في خمسة مواقع منفصلة ويستخدمها كتلف نهائي. ويُفترض أن تمثل كل قفزة ٢٠٪ من المرور. وينبغي ملاحظة أن هذا المنهج لا يمكن استخدامه إلا للتنبؤ بتشقق الكلل. يذكر (NCHRP) مايلي: "بالنسبة للتخدد، تقوم برمجيات الدليل بتعديل استجابات الرصف الفعلية لتأثيرات التمايل ويستخدم هذه الاستجابة المُحسنة لحساب التشوه الدائم التزايدي داخل كل طبقة". يُحسن النهج الثاني الاستجابات الإنشائية للرصف والمحسوبة بواسطة البرنامج الحاسوبي (3D Move) للأخذ في الحسبان تمايل العجلة. ويُجرَى التعديل بناءً على محاكاة "مونت كارلو" (Monte Carlo simulation). بعد ذلك، يتم إدخال الاستجابات المُحسنة في الدوال التجريبية المستخدمة أيضًا من قبل (NCHRP 2004)، للتنبؤ بالتلفيات داخل هيكل الرصف. في المنهج الثالث، طُوّر إطار يمكنه بشكل ظاهر مراعاة موقع التحميل العرضي بأي مستوى من العشوائية، مما يمكنه من محاكاة ظروف المرور المختلط حيث تنتقل الشاحنات التي يقودها الإنسان والشاحنات ذاتية القيادة عبر هياكل الرصف. بالإضافة إلى ذلك، يُدرج أيضًا عرض كل من المسار والمحور في حساب التلفيات بواسطة هذا الإطار. يمكن أن يتضمن هذا الإطار أي منهج لتراكم التلفيات (على سبيل المثال: ميكانيكي-تجريبي أو ميكانيكي)، بما في ذلك طريقة دليل تصميم الرصف الميكانيكي-التجريبي (MEPDG). ويمكن تعزيز معادلات تراكم التلفيات في طريقة دليل تصميم الرصف الميكانيكي-التجريبي بتقنيات إيجاد المنحنى، وتقريب الدوال من أجل المراعاة الظاهرة للموضع العرضي.

المراجع:

AASHTO (1993) *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.

AASHTO (2018) *LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP–Reinforced Concrete*. 2nd Edition. American Association of State highway and Transportation Officials, USA.

AASHTO (2020) *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice*. 3rd Edition. American Association of State highway and Transportation Officials, USA.

Asphalt Institute (2014) *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*. 7th Edition, USA.

FHWA (2008) *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. Federal Highway Administration, USA.

FHWA (2019) *Permeable Interlocking Concrete Pavement*. Federal Highway Administration, USA.

FDOT (2018) *Traffic Monitoring Handbook*. Florida Department of Transportation, Office of Transportation Data & Analytics, USA.

Gungor, O. E., Al-Qadi, I. L., & Ouyang, Y (2018). *Development of a flexible pavement design framework for autonomous and connected trucks*. Illinois Center for Transportation, USA.

MoC (1992) *Highway Design Manual, Volume 1 Highway Development*. Ministry of Communications, KSA.

MOMRAH (2006) *General Specifications of Urban Road Constructions*. Ministry of Municipal & Rural Affairs Deputy Ministry for Technical Affairs, KSA.

MOMRAH (2019) *Road Engineering Design Manual*. Ministry of Municipal & Rural Affairs Deputy Ministry for Technical Affairs, KSA.

NAPA (2020) *Perpetual Pavements: A Manual of Practice*. National Asphalt Pavement Association.

NCHRP (2004) *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. National Cooperative Highway Research Program.

NCHRP (2010) *Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt*. Report 648, National Cooperative Highway Research Program

RCJY (2020) *Guiding Engineering Manual*. Royal Commission for Jubail and Yanb, Royal Commission in Jubail Kingdom of Saudi Arabia.

Texas Department of Transportation (2021) *Pavement Manual*. USA

Thompson M.R. and Carpenter S.H. (2006) *Considering Hot-Mix-Asphalt Fatigue Endurance Limit in Full-Depth Mechanistic-Empirical Pavement Design*. Proc., International Conference on Perpetual Pavements, Columbus, OH.

Transport Ministry Innovation, Quality and Environment Center (2020b) *Improved Hot Mix Asphalt Design Manual*, Kingdom of Saudi Arabia.

VDOT (2003) *Guidelines for 1993 AASHTO Pavement Design*. Virginia Department of Transportation, Materials Division.

الملحق أ – عوامل تكافؤ الأحمال للتصميم الإنشائي للرصف المرن:

الجدول (أ–١) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢
٤	١,٨١	٠,٠٠٢	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
٦	٢,٧٢	٠,٠٠٩	٠,٠١٢	٠,٠١١	٠,٠١٠	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩
٨	٣,٦٩	٠,٠٣٠	٠,٠٣٥	٠,٠٣٦	٠,٠٣٣	٠,٠٣١	٠,٠٢٩
١٠	٤,٥٤	٠,٠٧٥	٠,٠٨٥	٠,٠٩٠	٠,٠٨٥	٠,٠٧٩	٠,٠٧٦
١٢	٥,٤٤	٠,١٦٥	٠,١٧٧	٠,١٨٩	٠,١٨٣	٠,١٧٤	٠,١٦٨
١٤	٦,٣٥	٠,٣٢٥	٠,٣٣٨	٠,٣٥٤	٠,٣٥٠	٠,٣٣٨	٠,٣٣١
١٦	٧,٢٦	٠,٥٨٩	٠,٥٩٨	٠,٦١٣	٠,٦١٢	٠,٦٠٣	٠,٥٩٦
١٨	٨,١٦	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠
٢٠	٩,٠٧	١,٦١	١,٥٩	١,٥٦	١,٥٥	١,٥٧	١,٥٩
٢٢	٩,٩٨	٢,٤٩	٢,٤٤	٢,٣٥	٢,٣١	٢,٣٥	٢,٤١
٢٤	١٠,٨٩	٣,٧١	٣,٦٢	٣,٤٣	٣,٣٣	٣,٤٠	٣,٥١
٢٦	١١,٧٩	٥,٣٦	٥,٢١	٤,٨٨	٤,٦٨	٤,٧٧	٤,٩٦
٢٨	١٢,٧	٧,٥٤	٧,٣١	٦,٧٨	٦,٤٢	٦,٥٢	٦,٨٣
٣٠	١٣,٦١	١٠,٤	١٠,٠	٩,٢	٨,٦	٨,٧	٩,٢
٣٢	١٤,٥١	١٤,٠	١٣,٥	١٢,٤	١١,٥	١١,٥	١٢,١
٣٤	١٥,٤٢	١٨,٥	١٧,٩	١٦,٣	١٥,٠	١٤,٩	١٥,٦
٣٦	١٦,٣٣	٢٤,٢	٢٣,٣	٢١,٢	١٩,٣	١٩,٠	١٩,٩
٣٨	١٧,٢٤	٣١,١	٢٩,٩	٢٧,١	٢٤,٦	٢٤,٠	٢٥,١
٤٠	١٨,١٤	٣٩,٦	٣٨,٠	٣٤,٣	٣٠,٩	٣٠,٠	٣١,٢
٤٢	١٩,٠٥	٤٩,٧	٤٧,٧	٤٣,٠	٣٨,٦	٣٧,٢	٣٨,٥
٤٤	١٩,٩٦	٦١,٨	٥٩,٣	٥٣,٤	٤٧,٦	٤٥,٧	٤٧,١
٤٦	٢٠,٨٦	٧٦,١	٧٣,٠	٦٥,٦	٥٨,٣	٥٥,٧	٥٧,٠
٤٨	٢١,٧٧	٩٢,٩	٨٩,١	٨٠,٠	٧٠,٩	٦٧,٣	٦٨,٦
٥٠	٢٢,٦٨	١١٣,٠	١٠٨,٠	٩٧,٠	٨٦,٠	٨١,٠	٨٢,٠

الجدول (أ–٢) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠
٤	١,٨١	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢
٦	٢,٧٢	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢
١٠	٤,٥٤	٠,٠٠٧	٠,٠٠٨	٠,٠٠٨	٠,٠٠٧	٠,٠٠٦	٠,٠٠٦
١٢	٥,٤٤	٠,٠١٣	٠,٠١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٤	٠,٠١٣	٠,٠١٢
١٤	٦,٣٥	٠,٠٢٤	٠,٠٢٩	٠,٠٢٩	٠,٠٢٦	٠,٠٢٤	٠,٠٢٣
١٦	٧,٢٦	٠,٠٤١	٠,٠٤٨	٠,٠٥٠	٠,٠٤٦	٠,٠٤٢	٠,٠٤٠
١٨	٨,١٦	٠,٠٦٦	٠,٠٧٧	٠,٠٨١	٠,٠٧٥	٠,٠٦٩	٠,٠٦٦
٢٠	٩,٠٧	٠,١٠٣	٠,١١٧	٠,١٢٤	٠,١١٧	٠,١٠٩	٠,١٠٥
٢٢	٩,٩٨	٠,١٥٦	٠,١٧١	٠,١٨٣	٠,١٧٤	٠,١٦٤	٠,١٥٨
٢٤	١٠,٨٩	٠,٢٢٧	٠,٢٤٤	٠,٢٦٠	٠,٢٥٢	٠,٢٣٩	٠,٢٣١
٢٦	١١,٧٩	٠,٣٢٢	٠,٣٤٠	٠,٣٦٠	٠,٣٥٣	٠,٣٣٨	٠,٣٢٩
٢٨	١٢,٧	٠,٤٤٧	٠,٤٦٥	٠,٤٨٧	٠,٤٨١	٠,٤٦٦	٠,٤٥٥
٣٠	١٣,٦١	٠,٦٠٧	٠,٦٢٣	٠,٦٤٦	٠,٦٤٣	٠,٦٢٧	٠,٦١٧
٣٢	١٤,٥١	٠,٨١٠	٠,٨٢٣	٠,٨٤٣	٠,٨٤٢	٠,٨٢٩	٠,٨١٩
٣٤	١٥,٤٢	١,٠٦	١,٠٧	١,٠٨	١,٠٨	١,٠٨	١,٠٧
٣٦	١٦,٣٣	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨
٣٨	١٧,٢٤	١,٧٦	١,٧٥	١,٧٣	١,٧٢	١,٧٣	١,٧٤
٤٠	١٨,١٤	٢,٢٢	٢,١٩	٢,١٥	٢,١٣	٢,١٦	٢,١٨
٤٢	١٩,٠٥	٢,٧٧	٢,٧٣	٢,٦٤	٢,٦٢	٢,٦٦	٢,٧٠
٤٤	١٩,٩٦	٣,٤٢	٣,٣٦	٣,٢٣	٣,١٨	٣,٢٤	٣,٣١
٤٦	٢٠,٨٦	٤,٢٠	٤,١١	٣,٩٢	٣,٨٣	٣,٩١	٤,٠٢
٤٨	٢١,٧٧	٥,١٠	٤,٩٨	٤,٧٢٥	٤,٥٨	٤,٦٨	٤,٨٣
٥٠	٢٢,٦٨	٦,١٥	٥,٩٩	٥,٦٤	٥,٤٤	٥,٥٦	٥,٧٧
٥٢	٢٣,٥٩	٧,٣٧	٧,١٦	٦,٧١	٦,٤٣	٦,٥٦	٦,٨٣
٥٤	٢٤,٤٩	٨,٧٧	٨,٥١	٧,٩٣	٧,٥٥	٧,٦٩	٨,٠٣
٥٦	٢٥,٤٠	١٠,٤	١٠,١	٩,٣	٨,٨	٩,٠	٩,٤
٥٨	٢٦,٣١	١٢,٢	١١,٨	١٠,٩	١٠,٣	١٠,٤	١٠,٩
٦٠	٢٧,٢٢	١٤,٣	١٣,٨	١٢,٧	١١,٩	١٢,٠	١٢,٦
٦٢	٢٨,١٢	١٦,٦	١٦,٠	١٤,٧	١٣,٧	١٣,٨	١٤,٥
٦٤	٢٩,٠٣	١٩,٣	١٨,٦	١٧,٠	١٥,٨	١٥,٨	١٦,٦
٦٦	٢٩,٩٤	٢٢,٢	٢١,٤	١٩,٦	١٨,٠	١٨,٠	١٨,٩
٦٨	٣٠,٨٤	٢٥,٥	٢٤,٦	٢٢,٤	٢٠,٦	٢٠,٥	٢١,٥

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٧٠	٣١,٧٥	٢٩,٢	٢٨,١	٢٥,٦	٢٣,٤	٢٣,٢	٢٤,٣
٧٢	٣٢,٦٦	٣٣,٣	٣٢,٠	٢٩,١	٢٦,٥	٢٦,٢	٢٧,٤
٧٤	٣٣,٥٧	٣٧,٨	٣٦,٤	٣٣,٠	٣٠,٠	٢٩,٤	٣٠,٨
٧٦	٣٤,٤٧	٤٢,٨	٤١,٢	٣٧,٣	٣٣,٨	٣٣,١	٣٤,٥
٧٨	٣٥,٣٨	٤٨,٤	٤٦,٥	٤٢,٠	٣٨,٠	٣٧,٠	٣٨,٦
٨٠	٣٦,٢٩	٥٤,٤	٥٢,٣	٤٧,٢	٤٢,٥	٤١,٣	٤٣,٠
٨٢	٣٧,١٩	٦١,١	٥٨,٧	٥٢,٩	٤٧,٦	٤٦,٠	٤٧,٨
٨٤	٣٨,١٠	٦٨,٤	٦٥,٧	٥٩,٢	٥٣,٠	٥١,٢	٥٣,٠
٨٦	٣٩,٠	٧٦,٣	٧٣,٣	٦٦,٠	٥٩,٠	٥٦,٨	٥٨,٦
٨٨	٣٩,٩٢	٨٥,٠	٨١,٦	٧٣,٤	٦٥,٥	٦٢,٨	٦٤,٧
٩٠	٤٠,٨٢	٩٤,٤	٩٠,٦	٨١,٥	٧٢,٦	٦٩,٤	٧١,٣

الجدول (أ–٣) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠
٤	١,٨١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١
٦	٢,٧٢	٠,٠٠٠٤	٠,٠٠٠٤	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٠٩	٠,٠٠١٠	٠,٠٠٠٩	٠,٠٠٠٨	٠,٠٠٠٧	٠,٠٠٠٧
١٠	٤,٥٤	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠١
١٢	٥,٤٤	٠,٠٠٤	٠,٠٠٤	٠,٠٠٤	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣
١٤	٦,٣٥	٠,٠٠٦	٠,٠٠٧	٠,٠٠٧	٠,٠٠٦	٠,٠٠٦	٠,٠٠٥
١٦	٧,٢٦	٠,٠١٠	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٠	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩
١٨	٨,١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٩	٠,٠١٩	٠,٠١٧	٠,٠١٥	٠,٠١٥
٢٠	٩,٠٧	٠,٠٢٤	٠,٠٢٩	٠,٠٢٩	٠,٠٢٦	٠,٠٢٤	٠,٠٢٣
٢٢	٩,٩٨	٠,٠٣٤	٠,٠٤٢	٠,٠٤٢	٠,٠٣٨	٠,٠٣٥	٠,٠٣٤
٢٤	١٠,٨٩	٠,٠٤٩	٠,٠٥٨	٠,٠٦٠	٠,٠٥٥	٠,٠٥١	٠,٠٤٨
٢٦	١١,٧٩	٠,٠٦٨	٠,٠٨٠	٠,٠٨٣	٠,٠٧٧	٠,٠٧١	٠,٠٦٨
٢٨	١٢,٧	٠,٠٩٣	٠,١٠٧	٠,١١٣	٠,١٠٥	٠,٠٩٨	٠,٠٩٤
٣٠	١٣,٦١	٠,١٢٥	٠,١٤٠	٠,١٤٩	٠,١٤٠	٠,١٣١	٠,١٢٦
٣٢	١٤,٥١	٠,١٦٤	٠,١٨٢	٠,١٩٤	٠,١٨٤	٠,١٧٣	٠,١٦٧
٣٤	١٥,٤٢	٠,٢١٣	٠,٢٣٣	٠,٢٤٨	٠,٢٣٨	٠,٢٢٥	٠,٢١٧
٣٦	١٦,٣٣	٠,٢٧٣	٠,٢٩٤	٠,٣١٣	٠,٣٠٣	٠,٢٨٨	٠,٢٧٩
٣٨	١٧,٢٤	٠,٣٤٦	٠,٣٦٨	٠,٣٩٠	٠,٣٨١	٠,٣٦٤	٠,٣٥٣

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٤٠	١٨,١٤	٠,٤٣٤	٠,٤٥٦	٠,٤٨١	٠,٤٧٣	٠,٤٥٤	٠,٤٤٣
٤٢	١٩,٠٥	٠,٥٣٨	٠,٥٦٠	٠,٥٨٧	٠,٥٨٠	٠,٥٦١	٠,٥٤٨
٤٤	١٩,٩٦	٠,٦٦٢	٠,٦٨٢	٠,٧١٠	٠,٧٠٥	٠,٦٨٦	٠,٦٧٣
٤٦	٢٠,٨٦	٠,٨٠٧	٠,٨٢٥	٠,٨٥٢	٠,٨٤٩	٠,٨٣١	٠,٨١٨
٤٨	٢١,٧٧	٠,٩٧٦	٠,٩٩٢	١,٠١٥	١,٠١٤	٠,٩٩٩	٠,٩٨٧
٥٠	٢٢,٦٨	١,١٧	١,١٨	١,٢٠	١,٢٠	١,١٩	١,١٨
٥٢	٢٣,٥٩	١,٤٠	١,٤٠	١,٤٢	١,٤٢	١,٤١	١,٤٠
٥٤	٢٤,٤٩	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦
٥٦	٢٥,٤٠	١,٩٥	١,٩٥	١,٩٣	١,٩٣	١,٩٤	١,٩٤
٥٨	٢٦,٣١	٢,٢٩	٢,٢٧	٢,٢٤	٢,٢٣	٢,٢٥	٢,٢٧
٦٠	٢٧,٢٢	٢,٦٧	٢,٦٤	٢,٥٩	٢,٥٧	٢,٦٠	٢,٦٣
٦٢	٢٨,١٢	٣,١٠	٣,٠٦	٢,٩٨	٢,٩٥	٢,٩٩	٣,٠٤
٦٤	٢٩,٠٣	٣,٥٩	٣,٣٥٣	٣,٤١	٣,٣٧	٣,٤٢	٣,٤٩
٦٦	٢٩,٩٤	٤,١٣	٤,٠٥	٣,٨٩	٣,٨٣	٣,٩٠	٣,٩٩
٦٨	٣٠,٨٤	٤,٧٣	٤,٦٣	٤,٤٣	٤,٣٤	٤,٤٢	٤,٥٤
٧٠	٣١,٧٥	٥,٤٠	٥,٢٨	٥,٠٣	٤,٩٠	٥,٠٠	٥,١٥
٧٢	٣٢,٦٦	٦,١٥	٦,٠٠	٥,٦٨	٥,٥٢	٥,٦٣	٥,٨٢
٧٤	٣٣,٥٧	٦,٩٧	٩,٧٩	٦,٤١	٦,٢٠	٦,٣٣	٦,٥٦
٧٦	٣٤,٤٧	٧,٨٨	٧,٦٧	٧,٢١	٦,٩٤	٧,٠٨	٧,٣٦
٧٨	٣٥,٣٨	٨,٨٨	٨,٦٣	٨,٠٩	٧,٧٥	٧,٩٠	٨,٢٣
٨٠	٣٦,٢٩	٩,٩٨	٩,٦٩	٩,٠٥	٨,٦٣	٨,٧٩	٩,١٨
٨٢	٣٧,١٩	١١,٢	١٠,٨	١٠,١	٩,٦	٩,٨	١٠,٢
٨٤	٣٨,١٠	١٢,٥	١٢,١	١١,٢	١٠,٦	١٠,٨	١١,٣
٨٦	٣٩,٠	١٣,٩	١٣,٥	١٢,٥	١١,٨	١١,٩	١٢,٥
٨٨	٣٩,٩٢	١٥,٥	١٥,٠	١٣,٨	١٣,٠	١٣,٢	١٣,٨
٩٠	٤٠,٨٢	١٧,٢	١٦,٦	١٥,٣	١٤,٣	١٤,٥	١٥,٢

الجدول (أ–٤) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993).

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠٤	٠,٠٠٠٤	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢
٤	١,٨١	٠,٠٠٣	٠,٠٠٤	٠,٠٠٤	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
٦	٢,٧٢	٠,٠١١	٠,٠١٧	٠,٠١٧	٠,٠١٣	٠,٠١٠	٠,٠٠٩
٨	٣,٦٩	٠,٠٣٢	٠,٠٤٧	٠,٠٥١	٠,٠٤١	٠,٠٣٤	٠,٠٣١
١٠	٤,٥٤	٠,٠٧٨	٠,١٠٢	٠,١١٨	٠,١٠٢	٠,٠٨٨	٠,٠٨٠

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
١٢	٥,٤٤	٠,١٦٨	٠,١٩٨	٠,٢٢٩	٠,٢١٣	٠,١٨٩	٠,١٧٦
١٤	٦,٣٥	٠,٣٢٨	٠,٣٥٨	٠,٣٩٩	٠,٣٨٨	٠,٣٦٠	٠,٣٤٢
١٦	٧,٢٦	٠,٥٩١	٠,٦١٣	٠,٦٤٦	٠,٦٤٥	٠,٦٢٣	٠,٦٠٦
١٨	٨,١٦	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠
٢٠	٩,٠٧	١,٦١	١,٥٧	١,٤٩	١,٤٧	١,٥١	١,٥٥
٢٢	٩,٩٨	٢,٤٨	٢,٣٨	٢,١٧	٢,٠٩	٢,١٨	٢,٣٠
٢٤	١٠,٨٩	٣,٦٩	٣,٤٩	٣,٠٩	٢,٨٩	٣,٠٣	٣,٢٧
٢٦	١١,٧٩	٥,٣٣	٤,٩٩	٤,٣١	٣,٩١	٤,٠٩	٤,٤٨
٢٨	١٢,٧	٧,٤٩	٦,٩٨	٥,٩٠	٥,٢١	٥,٣٩	٥,٩٨
٣٠	١٣,٦١	١٠,٣	٩,٥	٧,٩	٦,٨	٧,٠	٧,٨
٣٢	١٤,٥١	١٣,٩	١٢,٨	١٠,٥	٨,٨	٨,٩	١٠,٠
٣٤	١٥,٤٢	١٨,٤	١٦,٩	١٣,٧	١١,٣	١١,٢	١٢,٥
٣٦	١٦,٣٣	٢٤,٠	٢٢,٠	١٧,٧	١٤,٤	١٣,٩	١٥,٥
٣٨	١٧,٢٤	٣٠,٩	٢٨,٣	٢٢,٦	١٨,١	١٧,٢	١٩,٠
٤٠	١٨,١٤	٣٩,٣	٣٥,٩	٢٨,٥	٢٢,٥	٢١,١	٢٣,٠
٤٢	١٩,٠٥	٤٩,٣	٤٥,٠	٣٥,٦	٢٧,٨	٢٥,٦	٢٧,٧
٤٤	١٩,٩٦	٦١,٣	٥٥,٩	٤٤,٠	٣٤,٠	٣١,٠	٣٣,١
٤٦	٢٠,٨٦	٧٥,٥	٦٨,٨	٥٤,٠	٤١,٤	٣٧,٢	٣٩,٢
٤٨	٢١,٧٧	٩٢,٢	٨٣,٩	٦٥,٧	٥٠,١	٤٤,٥	٤٦,٥
٥٠	٢٢,٦٨	١١٢,٠	١٠٢,٠	٧٩,٠	٦٠,٠	٥٣,٠	٥٥,٠

الجدول (أ–٥) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993).

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠
٤	١,٨١	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٤	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٢
٦	٢,٧٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٤	٠,٠٠٦	٠,٠٠٥	٠,٠٠٤	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣
١٠	٤,٥٤	٠,٠٠٨	٠,٠١٣	٠,٠١١	٠,٠٠٩	٠,٠٠٧	٠,٠٠٦
١٢	٥,٤٤	٠,٠١٥	٠,٠٢٤	٠,٠٢٣	٠,٠١٨	٠,٠١٤	٠,٠١٣
١٤	٦,٣٥	٠,٠٢٦	٠,٠٤١	٠,٠٤٢	٠,٠٣٣	٠,٠٢٧	٠,٠٢٤
١٦	٧,٢٦	٠,٠٤٤	٠,٠٦٥	٠,٠٧٠	٠,٠٥٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٣
١٨	٨,١٦	٠,٠٧٠	٠,٠٩٧	٠,١٠٩	٠,٠٩٢	٠,٠٧٧	٠,٠٧٠
٢٠	٩,٠٧	٠,١٠٧	٠,١٤١	٠,١٦٢	٠,١٤١	٠,١٢١	٠,١١٠

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢٢	٩,٩٨	٠,١٦٠	٠,١٩٨	٠,٢٢٩	٠,٢٠٧	٠,١٨٠	٠,١٦٦
٢٤	١٠,٨٩	٠,٢٣١	٠,٢٧٣	٠,٣١٥	٠,٢٩٢	٠,٢٦٠	٠,٢٤٢
٢٦	١١,٧٩	٠,٣٢٧	٠,٣٧٠	٠,٤٢٠	٠,٤٠١	٠,٣٦٤	٠,٣٤٢
٢٨	١٢,٧	٠,٤٥١	٠,٤٩٣	٠,٥٤٨	٠,٥٣٤	٠,٤٩٥	٠,٤٧٠
٣٠	١٣,٦١	٠,٦١١	٠,٦٤٨	٠,٧٠٣	٠,٦٩٥	٠,٦٥٨	٠,٦٣٣
٣٢	١٤,٥١	٠,٨١٣	٠,٨٤٣	٠,٨٨٩	٠,٨٨٧	٠,٨٥٧	٠,٨٣٤
٣٤	١٥,٤٢	١,٠٦	١,٠٨	١,١١	١,١١	١,٠٩	١,٠٨
٣٦	١٦,٣٣	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨
٣٨	١٧,٢٤	١,٧٥	١,٧٣	١,٦٩	١,٦٨	١,٧٠	١,٧٣
٤٠	١٨,١٤	٢,٢١	٢,١٦	٢,٠٦	٢,٠٣	٢,٠٨	٢,١٤
٤٢	١٩,٠٥	٢,٧٦	٢,٦٧	٢,٤٩	٢,٤٣	٢,٥١	٢,٦١
٤٤	١٩,٩٦	٣,٤١	٣,٢٧	٢,٩٩	٢,٨٨	٣,٠٠	٣,١٦
٤٦	٢٠,٨٦	٤,١٨	٣,٩٨	٣,٥٨	٣,٤٠	٣,٥٥	٣,٧٩
٤٨	٢١,٧٧	٥,٠٨	٤,٨٠	٤,٢٥	٣,٩٨	٤,١٧	٤,٤٩
٥٠	٢٢,٦٨	٦,١٢	٥,٧٦	٥,٠٣	٤,٦٤	٤,٨٦	٥,٢٨
٥٢	٢٣,٥٩	٧,٣٣	٦,٨٧	٥,٩٣	٥,٣٨	٥,٦٣	٦,١٧
٥٤	٢٤,٤٩	٨,٧٢	٨,١٤	٦,٩٥	٦,٢٢	٦,٤٧	٧,١٥
٥٦	٢٥,٤٠	١٠,٣	٩,٦	٨,١	٧,٢	٧,٤	٨,٢
٥٨	٢٦,٣١	١٢,١	١١,٣	٩,٤	٨,٢	٨,٤	٩,٤
٦٠	٢٧,٢٢	١٤,٢	١٣,١	١٠,٩	٩,٤	٩,٦	١٠,٧
٦٢	٢٨,١٢	١٦,٥	١٥,٣	١٢,٦	١٠,٧	١٠,٨	١٢,١
٦٤	٢٩,٠٣	١٩,١	١٧,٦	١٤,٥	١٢,٢	١٢,٢	١٣,٧
٦٦	٢٩,٩٤	٢٢,١	٢٠,٣	١٦,٦	١٣,٨	١٣,٧	١٥,٤
٦٨	٣٠,٨٤	٢٥,٣	٢٣,٣	١٨,٩	١٥,٦	١٥,٤	١٧,٢
٧٠	٣١,٧٥	٢٩,٠	٢٦,٦	٢١,٥	١٧,٦	١٧,٢	١٩,٢
٧٢	٣٢,٦٦	٣٣,٠	٣٠,٣	٢٤,٤	١٩,٨	١٩,٢	٢١,٣
٧٤	٣٣,٥٧	٣٧,٥	٣٤,٤	٣٧,٦	٢٢,٢	٢١,٣	٢٣,٦
٧٦	٣٤,٤٧	٤٢,٥	٣٨,٩	٣١,١	٢٤,٨	٢٣,٧	٢٦,١
٧٨	٣٥,٣٨	٤٨,٠	٤٣,٩	٣٥,٠	٢٧,٨	٢٦,٢	٢٨,٨
٨٠	٣٦,٢٩	٥٤,٠	٤٩,٤	٣٩,٢	٣٠,٩	٢٩,٠	٣١,٧
٨٢	٣٧,١٩	٦٠,٦	٥٥,٤	٤٣,٩	٣٤,٤	٣٢,٠	٣٤,٨
٨٤	٣٨,١٠	٦٧,٨	٦١,٩	٤٩,٠	٣٨,٢	٣٥,٣	٣٨,١
٨٦	٣٩,٠	٧٥,٧	٦٩,١	٥٤,٥	٤٢,٣	٣٨,٨	٤١,٧
٨٨	٣٩,٩٢	٨٤,٣	٧٦,٩	٦٠,٦	٤٦,٨	٤٢,٦	٤٥,٦
٩٠	٤٠,٨٢	٩٣,٧	٨٥,٤	٦٧,١	٥١,٧	٤٦,٨	٤٩,٧

الجدول (أ–٦) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993).

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠
٤	١,٨١	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١
٦	٢,٧٢	٠,٠٠٠٦	٠,٠٠٠٧	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٤	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣
٨	٣,٦٩	٠,٠٠١	٠,٠٠٢	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١
١٠	٤,٥٤	٠,٠٠٣	٠,٠٠٤	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
١٢	٥,٤٤	٠,٠٠٥	٠,٠٠٧	٠,٠٠٦	٠,٠٠٤	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣
١٤	٦,٣٥	٠,٠٠٨	٠,٠١٢	٠,٠١٠	٠,٠٠٨	٠,٠٠٦	٠,٠٠٦
١٦	٧,٢٦	٠,٠١٢	٠,٠١٩	٠,٠١٨	٠,٠١٣	٠,٠١١	٠,٠١٠
١٨	٨,١٦	٠,٠١٨	٠,٠٢٩	٠,٠٢٨	٠,٠٢١	٠,٠١٧	٠,٠١٦
٢٠	٩,٠٧	٠,٠٢٧	٠,٠٤٢	٠,٠٤٢	٠,٠٣٢	٠,٠٢٧	٠,٠٢٤
٢٢	٩,٩٨	٠,٠٣٨	٠,٠٥٨	٠,٠٦٠	٠,٠٤٨	٠,٠٤٠	٠,٠٣٦
٢٤	١٠,٨٩	٠,٠٥٣	٠,٠٧٨	٠,٠٨٤	٠,٠٦٨	٠,٠٥٧	٠,٠٥١
٢٦	١١,٧٩	٠,٠٧٢	٠,١٠٣	٠,١١٤	٠,٠٩٥	٠,٠٨٠	٠,٠٧٢٥
٢٨	١٢,٧	٠,٠٩٨	٠,١٣٣	٠,١٥١	٠,١٢٨	٠,١٠٩	٠,٠٩٩
٣٠	١٣,٦١	٠,١٢٩	٠,١٦٩	٠,١٩٥	٠,١٧٠	٠,١٤٥	٠,١٣٣
٣٢	١٤,٥١	٠,١٦٩	٠,٢١٣	٠,٢٤٧	٠,٢٢٠	٠,١٩١	٠,١٧٥
٣٤	١٥,٤٢	٠,٢١٩	٠,٢٦٦	٠,٣٠٨	٠,٢٨١	٠,٢٤٦	٠,٢٢٨
٣٦	١٦,٣٣	٠,٢٧٩	٠,٣٢٩	٠,٣٧٩	٠,٣٥٢	٠,٣١٣	٠,٢٩٢
٣٨	١٧,٢٤	٠,٣٥٢	٠,٤٠٣	٠,٤٦١	٠,٤٣٦	٠,٣٩٣	٠,٣٦٨
٤٠	١٨,١٤	٠,٤٣٩	٠,٤٩١	٠,٥٥٤	٠,٥٣٣	٠,٤٨٧	٠,٤٥٩
٤٢	١٩,٠٥	٠,٥٤٣	٠,٥٩٤	٠,٦٦١	٠,٦٤٤	٠,٥٩٧	٠,٥٦٧
٤٤	١٩,٩٦	٠,٦٦٦	٠,٧١٤	٠,٧٨١	٠,٧٦٩	٠,٧٢٣	٠,٦٩٢
٤٦	٢٠,٨٦	٠,٨١١	٠,٨٥٤	٠,٩١٨	٠,٩١١	٠,٨٦٨	٠,٨٣٨
٤٨	٢١,٧٧	٠,٩٧٩	١,٠١٥	١,٠٧٢	١,٠٦٩	١,٠٣٣	١,٠٠٥
٥٠	٢٢,٦٨	١,١٧	١,٢٠	١,٢٤	١,٢٥	١,٢٢	١,٢٠
٥٢	٢٣,٥٩	١,٤٠	١,٤١	١,٤٤	١,٤٤	١,٤٣	١,٤١
٥٤	٢٤,٤٩	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦
٥٦	٢٥,٤٠	١,٩٥	١,٩٣	١,٩٠	١,٩٠	١,٩١	١,٩٣
٥٨	٢٦,٣١	٢,٢٩	٢,٢٥	٢,١٧	٢,١٦	٢,٢٠	٢,٢٤
٦٠	٢٧,٢٢	٢,٦٧	٢,٦٠	٢,٤٨	٢,٤٤	٢,٥١	٢,٥٨
٦٢	٢٨,١٢	٣,٠٩	٣,٠٠	٢,٨٢	٢,٧٦	٢,٨٥	٢,٩٥
٦٤	٢٩,٠٣	٣,٥٧	٣,٤٤	٣,١٩	٣,١٠	٣,٢٢	٣,٣٦
٦٦	٢٩,٩٤	٤,١١	٣,٩٤	٣,٦١	٣,٤٧	٣,٦٢	٣,٨١
٦٨	٣٠,٨٤	٤,٧١	٤,٤٩	٤,٠٦	٣,٨٨	٤,٠٥	٤,٣٠

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٧٠	٣١,٧٥	٥,٣٨	٥,١١	٤,٥٧	٤,٣٢	٤,٥٢	٤,٨٤
٧٢	٣٢,٦٦	٦,١٢	٥,٧٩	٥,١٣	٤,٨٠	٥,٠٣	٥,٤١
٧٤	٣٣,٥٧	٦,٩٣	٦,٥٤	٥,٧٤	٥,٣٢	٥,٥٧	٦,٠٤
٧٦	٣٤,٤٧	٧,٨٤	٧,٣٧	٦,٤١	٥,٨٨	٦,١٥	٦,٧١
٧٨	٣٥,٣٨	٨,٨٣	٨,٢٨	٧,١٤	٦,٤٩	٦,٧٨	٧,٤٣
٨٠	٣٦,٢٩	٩,٩٢	٩,٢٨	٧,٩٥	٧,١٥	٧,٤٥	٨,٢١
٨٢	٣٧,١٩	١١,١	١٠,٤	٨,٨	٧,٩	٨,٢	٩,٠
٨٤	٣٨,١٠	١٢,٤	١١,٦	٩,٨	٨,٦	٨,٩	٩,٩
٨٦	٣٩,٠	١٣,٨	١٢,٩	١٠,٨	٩,٥	٩,٨	١٠,٩
٨٨	٣٩,٩٢	١٥,٤	١٤,٣	١١,٩	١٠,٤	١٠,٦	١١,٩
٩٠	٤٠,٨٢	١٧,١	١٥,٨	١٣,٢	١١,٣	١١,٦	١٢,٩

الجدول (أ–٧) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠٨	٠,٠٠٠٩	٠,٠٠٠٦	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢
٤	١,٨١	٠,٠٠٤	٠,٠٠٨	٠,٠٠٦	٠,٠٠٤	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
٦	٢,٧٢	٠,٠١٤	٠,٠٣٠	٠,٠٢٨	٠,٠١٨	٠,٠١٢	٠,٠١٠
٨	٣,٦٩	٠,٠٣٥	٠,٠٧٠	٠,٠٨٠	٠,٠٥٥	٠,٠٤٠	٠,٠٣٤
١٠	٤,٥٤	٠,٠٨٢	٠,١٣٢	٠,١٦٨	٠,١٣٢	٠,١٠١	٠,٠٨٦
١٢	٥,٤٤	٠,١٧٣	٠,٢٣١	٠,٢٩٦	٠,٢٦٠	٠,٢١٢	٠,١٨٧
١٤	٦,٣٥	٠,٣٣٢	٠,٣٨٨	٠,٤٦٨	٠,٤٤٧	٠,٣٩١	٠,٣٥٨
١٦	٧,٢٦	٠,٥٩٤	٠,٦٣٣	٠,٦٩٥	٠,٦٩٣	٠,٦٥١	٠,٦٢٢
١٨	٨,١٦	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠
٢٠	٩,٠٧	١,٦٠	١,٥٣	١,٤١	٠,٣٨	١,٤٤	١,٥١
٢٢	٩,٩٨	٢,٤٧	٢,٢٩	١,٩٦	١,٨٣	١,٩٧	٢,١٦
٢٤	١٠,٨٩	٣,٦٧	٣,٣٣	٢,٦٩	٢,٣٩	٢,٦٠	٢,٩٦
٢٦	١١,٧٩	٥,٢٩	٤,٧٢	٣,٦٥	٣,٠٨	٣,٣٣	٣,٩١
٢٨	١٢,٧	٧,٤٣	٦,٥٦	٤,٨٨	٣,٩٣	٤,١٧	٥,٠٠
٣٠	١٣,٦١	١٠,٢	٨,٩	٦,٥	٥,٠	٥,١	٦,٣
٣٢	١٤,٥١	١٣,٨	١٢,٠	٨,٤	٦,٢	٦,٣	٧,٧
٣٤	١٥,٤٢	١٨,٢	١٥,٧	١٠,٩	٧,٨	٧,٦	٩,٣
٣٦	١٦,٣٣	٢٣,٨	٢٠,٤	١٤,٠	٩,٧	٩,٠١	١١,٠
٣٨	١٧,٢٤	٣٠,٦	٢٦,٢	١٧,٧	١١,٩	١١,٠	١٣,٠
٤٠	١٨,١٤	٣٨,٨	٣٣,٢	٢٢,٢	١٤,٦	١٣,١	١٥,٣
٤٢	١٩,٠٥	٤٨,٨	٤١,٦	٢٧,٦	١٧,٨	١٥,٥	١٧,٨
٤٤	١٩,٩٦	٦٠,٦	٥١,٦	٣٤,٠	٢١,٦	١٨,٤	٢٠,٦
٤٦	٢٠,٨٦	٧٤,٧	٦٣,٤	٤١,٥	٢٦,١	٢١,٦	٢٣,٨
٤٨	٢١,٧٧	٩١,٢	٧٧,٣	٥٠,٣	٣١,٣	٢٥,٤	٢٧,٤
٥٠	٢٢,٦٨	١١٠,٠	٩٤,٠	٦١,٠	٣٧,٠	٣٠,٠	٣٢,٠

الجدول (أ–٨) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠
٤	١,٨١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠٠	٠,٠٠٠	٠,٠٠٠
٦	٢,٧٢	٠,٠٠٣	٠,٠٠٤	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠١	٠,٠٠١

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٦	٠,٠١١	٠,٠٠٩	٠,٠٠٥	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣
١٠	٤,٥٤	٠,٠١١	٠,٠٢٤	٠,٠٢٠	٠,٠١٢	٠,٠٠٨	٠,٠٠٧
١٢	٥,٤٤	٠,٠١٩	٠,٠٤٢	٠,٠٣٩	٠,٠٢٤	٠,٠١٧	٠,٠١٤
١٤	٦,٣٥	٠,٠٣١	٠,٠٦٦	٠,٠٦٨	٠,٠٤٥	٠,٠٣٢	٠,٠٢٦
١٦	٧,٢٦	٠,٠٤٩	٠,٠٩٦	٠,١٠٩	٠,٠٧٦	٠,٠٥٥	٠,٠٤٦
١٨	٨,١٦	٠,٠٧٥	٠,١٣٤	٠,١٦٤	٠,١٢١	٠,٠٩٠	٠,٠٧٦
٢٠	٩,٠٧	٠,١١٣	٠,١٨١	٠,٢٣٢	٠,١٨٢	٠,١٣٩	٠,١١٩
٢٢	٩,٩٨	٠,١٦٦	٠,٢٤١	٠,٣١٣	٠,٢٦٠	٠,٢٠٥	٠,١٧٨
٢٤	١٠,٨٩	٠,٢٣٨	٠,٣١٧	٠,٤٠٧	٠,٣٥٨	٠,٢٩٢	٠,٢٥٧
٢٦	١١,٧٩	٠,٣٣٣	٠,٤١٣٦	٠,٥١٧	٠,٤٧٦	٠,٤٠٢	٠,٣٦٠
٢٨	١٢,٧	٠,٤٥٧	٠,٥٣٤	٠,٦٤٣	٠,٦١٤	٠,٥٣٨	٠,٤٩٢
٣٠	١٣,٦١	٠,٦١٦	٠,٦٨٤	٠,٧٨٨	٠,٧٧٣	٠,٧٠٢	٠,٦٥٦
٣٢	١٤,٥١	٠,٨١٧	٠,٨٧٠	٠,٩٥٦	٠,٩٥٣	٠,٨٩٦	٠,٨٥٥
٣٤	١٥,٤٢	١,٠٧	١,١٠	١,١٥	١,١٥	١,١٢	١,٠٩
٣٦	١٦,٣٣	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨	١,٣٨
٣٨	١٧,٢٤	١,٧٥	١,٧١	١,٦٤	١,٦٢	١,٦٦	١,٧٠
٤٠	١٨,١٤	٢,٢١	٢,١١	١,٩٤	١,٨٩	١,٩٨	٢٠,٨
٤٢	١٩,٠٥	٢,٧٥	٢,٥٩	٢,٢٩	٢,١٩	٢,٣٣	٢,٥٠
٤٤	١٩,٩٦	٣,٣٩	٣,١٥	٢,٧٠	٢,٥٢	٢,٧١	٢,٩٧
٤٦	٢٠,٨٦	٤,١٥	٣,٨١	٣,١٦	٢,٨٩	٣,١٣	٣,٥٠
٤٨	٢١,٧٧	٥,٠٤	٤,٥٨	٣,٧٠	٣,٢٩	٣,٥٧	٤,٠٧
٥٠	٢٢,٦٨	٦,٠٨	٥,٤٧	٤,٣١	٣,٧٤	٤,٠٥	٤,٧٠
٥٢	٢٣,٥٩	٧,٢٧	٦,٤٩	٥,٠١	٤,٢٤	٤,٥٧	٥,٣٧
٥٤	٢٤,٤٩	٨,٦٥	٧,٦٧	٥,٨١	٤,٧٩	٥,١٣	٦,١٠
٥٦	٢٥,٤٠	١٠,٢	٩,٠	٦,٧	٥,٤	٥,٧	٦,٩
٥٨	٢٦,٣١	١٢,٠	١٠,٦	٧,٧	٦,١	٦,٤	٧,٧
٦٠	٢٧,٢٢	١٤,١	١٢,٣	٨,٩	٦,٨	٧,١	٨,٦
٦٢	٢٨,١٢	١٦,٣	١٤,٢	١٠,٢	٧,٧	٧,٨	٩,٥
٦٤	٢٩,٠٣	١٨,٩	١٦,٤	١١,٦	٨,٦	٨,٦	١٠,٥
٦٦	٢٩,٩٤	٢١,٨	١٨,٩	١٣,٢	٩,٦	٩,٥	١١,٦
٦٨	٣٠,٨٤	٢٥,١	٢١,٧	١٥,٠	١٠,٧	١٠,٥	١٢,٧
٧٠	٣١,٧٥	٢٨,٧	٢٤,٧	١٧,٠	١٢,٠	١١,٥	١٣,٩
٧٢	٣٢,٦٦	٣٢,٧	٢٨,١	١٩,٢	١٣,٣	١٢,٦	١٥,٢
٧٤	٣٣,٥٧	٣٧,٢	٣١,٩	٢١,٦	١٤,٨	١٣,٨	١٦,٥
٧٦	٣٤,٤٧	٤٢,١	٣٦,٠	٢٤,٣	١٦,٤	١٥,١	١٧,٩
٧٨	٣٥,٣٨	٤٧,٥	٤٠,٦	٢٧,٣	١٨,٢	١٦,٥	١٩,٤

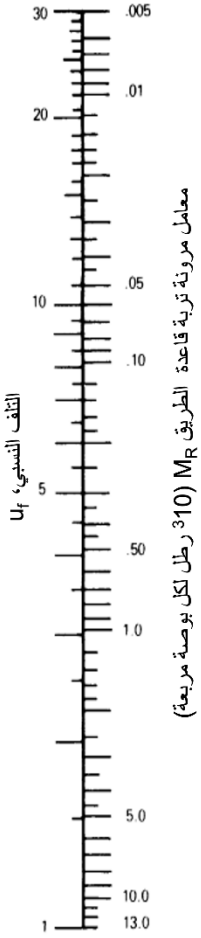
حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٨٠	٣٦,٢٩	٥٣,٤	٤٥,٧	٣٠,٥	٢٠,١	١٨,٠	٢١,٠
٨٢	٣٧,١٩	٦٠,٠	٥١,٢	٣٤,٠	٢٢,٢	١٩,٦	٢٢,٧
٨٤	٣٨,١٠	٦٧,١	٥٧,٢	٣٧,٩	٢٤,٦	٢١,٣	٢٤,٥
٨٦	٣٩,٠	٧٤,٩	٦٣,٨	٤٢,١	٢٧,١	٢٣,٢	٢٦,٤
٨٨	٣٩,٩٢	٨٣,٤	٧١,٠	٤٦,٧	٢٩,٨	٢٥,٢	٢٨,٤
٩٠	٤٠,٨٢	٩٢,٧	٧٨,٨	٥١,٧	٣٢,٧	٢٧,٤	٣٠,٥

الجدول (أ–٩) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات المرنة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠	٠,٠٠٠٠
٤	١,٨١	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٤	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١
٦	٢,٧٢	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠٠	٠,٠٠٠
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٣	٠,٠٠٤	٠,٠٠٢	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١
١٠	٤,٥٤	٠,٠٠٥	٠,٠٠٨	٠,٠٠٥	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
١٢	٥,٤٤	٠,٠٠٧	٠,٠١٤	٠,٠١٠	٠,٠٠٦	٠,٠٠٤	٠,٠٠٣
١٤	٦,٣٥	٠,٠١١	٠,٠٢٣	٠,٠١٨	٠,٠١١	٠,٠٠٧	٠,٠٠٦
١٦	٧,٢٦	٠,٠١٦	٠,٠٣٥	٠,٠٣٠	٠,٠١٨	٠,٠١٣	٠,٠١٠
١٨	٨,١٦	٠,٠٢٢	٠,٠٥٠	٠,٠٤٧	٠,٠٢٩	٠٠,٢٠	٠,٠١٧
٢٠	٩,٠٧	٠,٠٣١	٠,٠٦٩	٠,٠٦٩	٠,٠٤٤	٠,٠٣١	٠,٠٢٦
٢٢	٩,٩٨	٠,٠٤٣	٠,٠٩٠	٠,٠٩٧	٠,٠٦٥	٠,٠٤٦	٠,٠٣٩
٢٤	١٠,٨٩	٠,٠٥٩	٠,١١٦	٠,١٣٢	٠٠٩٢	٠,٠٦٦	٠,٠٥٦
٢٦	١١,٧٩	٠,٠٧٩	٠,١٤٥	٠,١٧٤	٠,١٢٦	٠,٠٩٢	٠,٠٧٨
٢٨	١٢,٧	٠,١٠٤	٠,١٧٩	٠,٢٢٣	٠,١٦٨	٠,١٢٦	٠,١٠٧
٣٠	١٣,٦١	٠,١٣٦	٠,٢١٨	٠,٢٧٩	٠,٢١٩	٠,١٦٧	٠,١٤٣
٣٢	١٤,٥١	٠,١٧٦	٠,٢٦٥	٠,٣٤٢	٠,٢٧٩	٠,٢١٨	٠,١٨٨
٣٤	١٥,٤٢	٠,٢٢٦	٠,٣١٩	٠,٤١٣	٠,٣٥٠	٠,٢٧٩	٠,٢٤٣
٣٦	١٦,٣٣	٠,٢٨٦	٠,٣٨٢	٠,٤٩١	٠,٤٣٢	٠,٣٥٢	٠,٣١٠
٣٨	١٧,٢٤	٠,٣٥٩	٠,٤٥٦	٠,٥٧٧	٠,٥٢٤	٠,٤٣٧	٠,٣٨٩
٤٠	١٨,١٤	٠,٤٤٧	٠,٥٤٣	٠,٦٧١	٠,٦٢٦	٠,٥٣٦	٠,٤٨٣
٤٢	١٩,٠٥	٠,٥٥٠	٠,٦٤٣	٠,٧٧٥	٠,٧٤٠	٠,٦٤٩	٠,٥٩٣
٤٤	١٩,٩٦	٠,٦٧٣	٠,٧٦٠	٠,٨٨٩	٠,٨٦٥	٠,٧٧٧	٠,٧٢٠
٤٦	٢٠,٨٦	٠,٨١٧	٠,٨٦٤	١,٠١٤	١,٠٠١	٠,٩٢٠	٠,٨٦٥
٤٨	٢١,٧٧	٠,٩٨٤	١,٠٤٨	١,١٥٢	١,١٤٨	١,٠٨٠	١,٠٣٠

حمل المحور		الرقم الإنشائي للرصف					
ألف رطل	طن	١	٢	٣	٤	٥	٦
٥٠	٢٢,٦٨	١,١٨	١,٢٣	١,٣٠	١,٣١	١,٢٦	١,٢٢
٥٢	٢٣,٥٩	١,٤٠	١,٤٣	١,٤٧	١,٤٨	١,٤٥	١,٤٣
٥٤	٢٤,٤٩	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦	١,٦٦
٥٦	٢٥,٤٠	١,٩٥	١,٩٢	١,٨٦	١,٨٥	١,٨٨	١,٩١
٥٨	٢٦,٣١	٢,٢٨	٢,٢١	٢,٠٩	٢,٠٦	٢,١٣	٢,٢٠
٦٠	٢٧,٢٢	٢,٦٦	٢,٥٤	٢,٣٤	٢,٢٨	٢,٣٩	٢,٥٠
٦٢	٢٨,١٢	٣,٠٨	٢,٩٢	٢,٦١	٢,٥٢	٢,٦٦	٢,٨٤
٦٤	٢٩,٠٣	٣,٥٦	٣,٣٣	٢,٩٢	٢,٧٧	٢,٩٦	٣,١٩
٦٦	٢٩,٩٤	٤,٠٩	٣,٧٩	٣,٢٥	٣,٠٤	٣,٢٧	٣,٥٨
٦٨	٣٠,٨٤	٤,٦٨	٤,٣١	٣,٦٢	٣,٣٣	٣,٦٠	٤,٠٠
٧٠	٣١,٧٥	٥,٣٤	٤,٨٨	٤,٠٢	٣,٦٤	٣,٩٤	٤,٤٤
٧٢	٣٢,٦٦	٦,٠٨	٥,٥١	٤,٤٦	٣,٩٧	٤,٣١	٤,٩١
٧٤	٣٣,٥٧	٦,٨٩	٦,٢١	٤,٩٤	٤,٣٢	٤,٦٩	٥,٤٠
٧٦	٣٤,٤٧	٧,٧٨	٦,٩٨	٥,٤٧	٤,٧٠	٥,٠٩	٥,٩٣
٧٨	٣٥,٣٨	٨,٧٦	٧,٨٣	٦,٠٤	٥,١١	٥,٥١	٦,٤٨
٨٠	٣٦,٢٩	٩,٨٤	٨,٧٥	٦,٦٧	٥,٥٤	٥,٩٦	٧,٠٦
٨٢	٣٧,١٩	١١,٠	٩,٨	٧,٤	٦,٠	٦,٤	٧,٧
٨٤	٣٨,١٠	١٢,٣	١٠,٩	٨,١	٦,٥	٦,٩	٨,٣
٨٦	٣٩,٠	١٣,٧	١٢,١	٨,٩	٧,٠	٧,٤	٩,٠
٨٨	٣٩,٩٢	١٥,٣	١٣,٤	٩,٨	٧,٦	٨,٠	٩,٦
٩٠	٤٠,٨٢	١٦,٩	١٤,٨	١٠,٧	٨,٢	٨,٥	١٠,٤

الملحق ب - المعامل الفعال لمرونة القاعدة الترابية للرصفيات المرنة



الشهر	معامل مرونة تربة قاعدة الطريق M_R (رطل لكل بوصة مربعة)	التلف النسبي، u_f
يناير	20.000	0.01
فبراير	20.000	0.01
مارس	2.500	1.51
أبريل	4.000	0.51
مايو	4.000	0.51
يونيو	7.000	0.13
يوليو	7.000	0.13
أغسطس	7.000	0.13
سبتمبر	7.000	0.13
أكتوبر	7.000	0.13
نوفمبر	4.000	0.5
ديسمبر	20.000	0.01
	المجموع: $u_f \Sigma$ =	3.72

متوسط: $\overline{u_f} = \frac{u_f \Sigma}{n} = \frac{3.72}{12} = 0.31$

معامل مرونة تربة قاعدة الطريق M_R(رطل لكل بوصة مربعة) = 5.000 (متوافق مع $\overline{u_f}$)

الشكل (ب–١) مثال لتقدير المعامل الفعال لمرونة طبقة القاعدة الترابية للرصفيات المرنة (AASHTO,1993).

الملحق ج - مثال على التصميم الإنشائي للرصف المرن بطريقة (AASHT0) التجريبية:

فيما يلي مثال لتطبيق طريقة (AASHTO) للتصميم التجريبي في حالة طريق سريع ذي أربع مسارات للاتجاه الواحد ومؤشر مرور متوقع بقيمة (٢٠×١٠^{٦}) من مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) لمدة تصميمية قدرها ٢٠ سنة.

١- اختر مستوى الثقة في الأداء R (٪) من الجدول (٥-٧). لنفرض أن قيمته ٩٥ ٪.

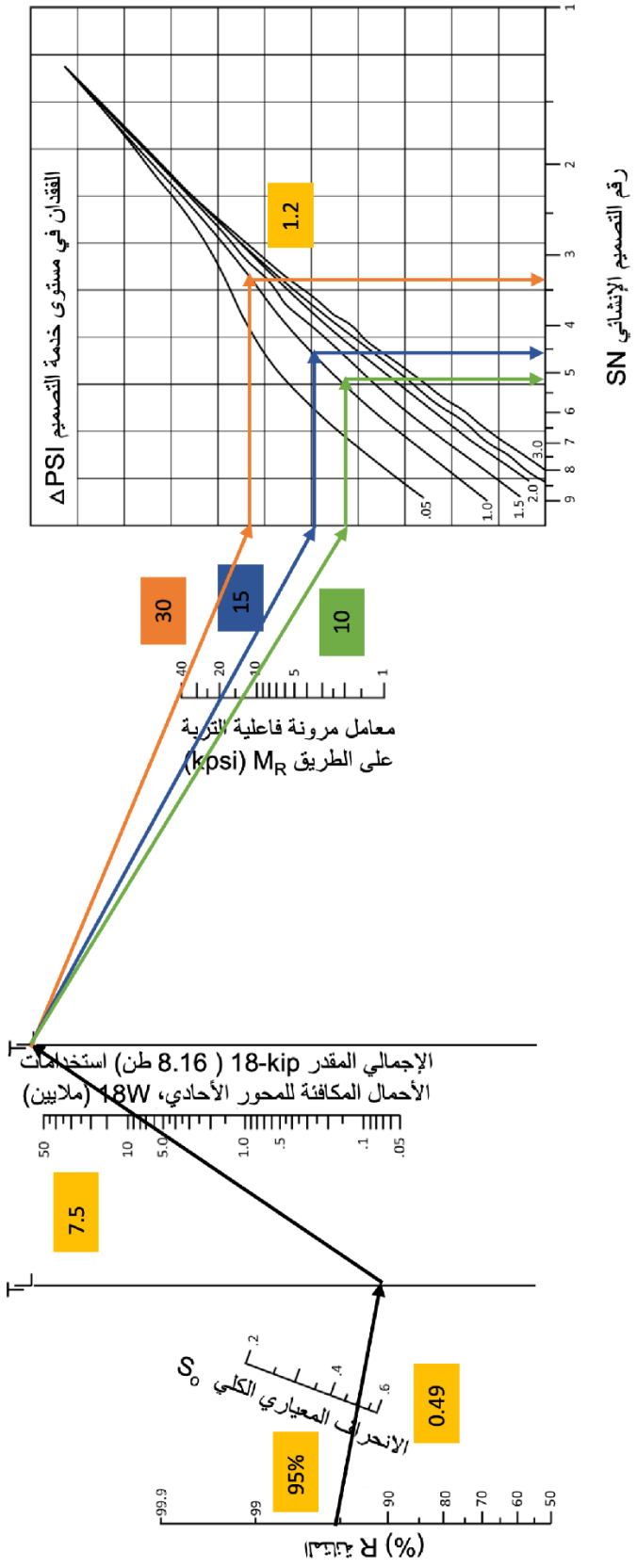
٢- اختر الانحراف المعياري الكلي (S_o) وفقًا للجزء الفرعي (٥-٢-٥)، تُختار قيمة بمقدار ٠,٤٩.

٣- احسب عدد مرات تطبيق مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) للمسار التصميمي وفقًا للمعادلة (٥-٤). عامل التوزيع الاتجاهي (D_D) يساوي ٠,٥ والقيمة المفترضة للتوزيع على المسارات تساوي ٧٥٪ وفقًا للجدول (٥-٦). لذا، فإن (w_{18} = ٢٠×٠,٧٥×٠,٥ = ٧,٥×١٠^{٦} ملحوظة: من أجل حساب مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL)، يجب افتراض الرقم الإنشائي الأولي (SNi) للهيكل الإنشائي للرصف. احسب قيمة (SNi') من الشكل (٥-١٠). وفي حالة عدم وجود تتطابق بين قيمتي SNi و SNi'، فعندئذٍ يجب تكرار العملية باستخدام رقم إنشائي جديد = (SNi + SNi') / 2). أعد حساب عدد مرات تطبيق مكافئ الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL). كرر العملية السابقة إلى أن يتطابق الرقم الإنشائي المفترض مع الرقم الإنشائي المحسوب.

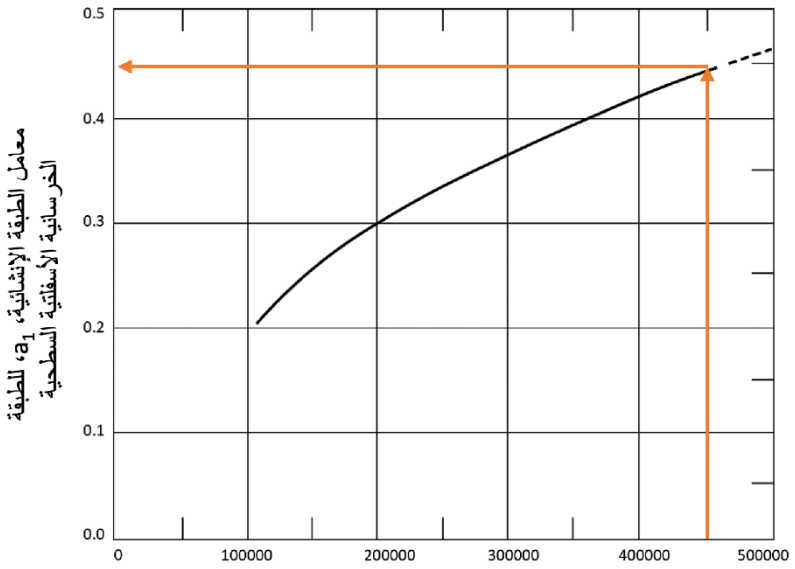
٤- حدد ΔPSI بتطبيق المعادلة (٥-١). مؤشر مستوى الخدمة الأولي (p_i) يساوي ٤,٢ والنهائي (p_t) يساوي ٣,٠. ولذا فإن قيمة ΔPSI = ١٢.

٥- حدد الرقم الإنشائي SN_1 و SN_2 و SN_3 من الشكل (٥-٨). عند معامل المرونة (M_R) = $E_{2(base\ course)}$ = ٢٠٧ ميجا باسكال (٣٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)، فإن قيمة الرقم الإنشائي SN_1 هي ٣,٤. وعند معامل المرونة (M_R) = $E_{3(subbase\ course)}$ = ١٠٣ ميجا باسكال (١٥,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)، فإن قيمة الرقم الإنشائي SN_2 هي ٤,٥. وعند معامل المرونة (M_R) = $E_{4(subgrade\ course)}$ = ٧٠ ميجا باسكال (١٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)، فإن قيمة الرقم الإنشائي SN_3 هي ٥,٢.

٦- حدد معاملات الطبقة a_1 و a_2 و a_3 من الشكل (٥-٣) و الشكل (٥-٤) و الشكل (٥-٥)، على التوالي. عند E_1 = ٣,١٠٠ ميجا باسكال (٤٥٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) فإن a_1 = ٠,٤٤ الشكل (ج-٢) وعند E_2 = ٢٠٧ ميجا باسكال (٣٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) فإن a_2 = ٠,١٤ الشكل(ج-٣). وعند E_3 = ١٠٣ ميجا باسكال (١٥,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) فإن a_3 = ٠,١١ الشكل(ج-٤).

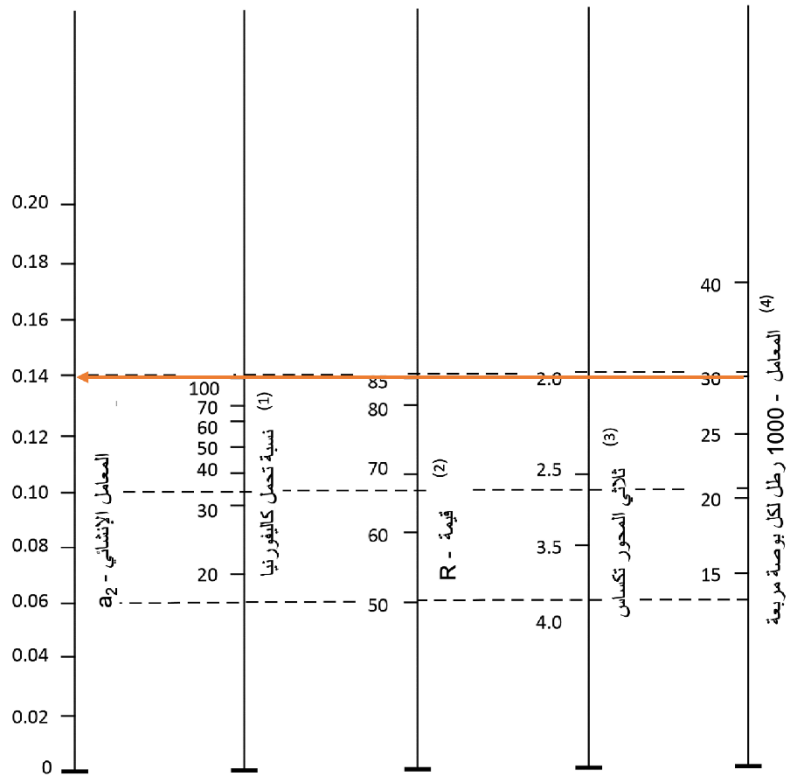


الشكل (ج–١) مثال لرسم بياني تصميمي للرصفيات المرنة.



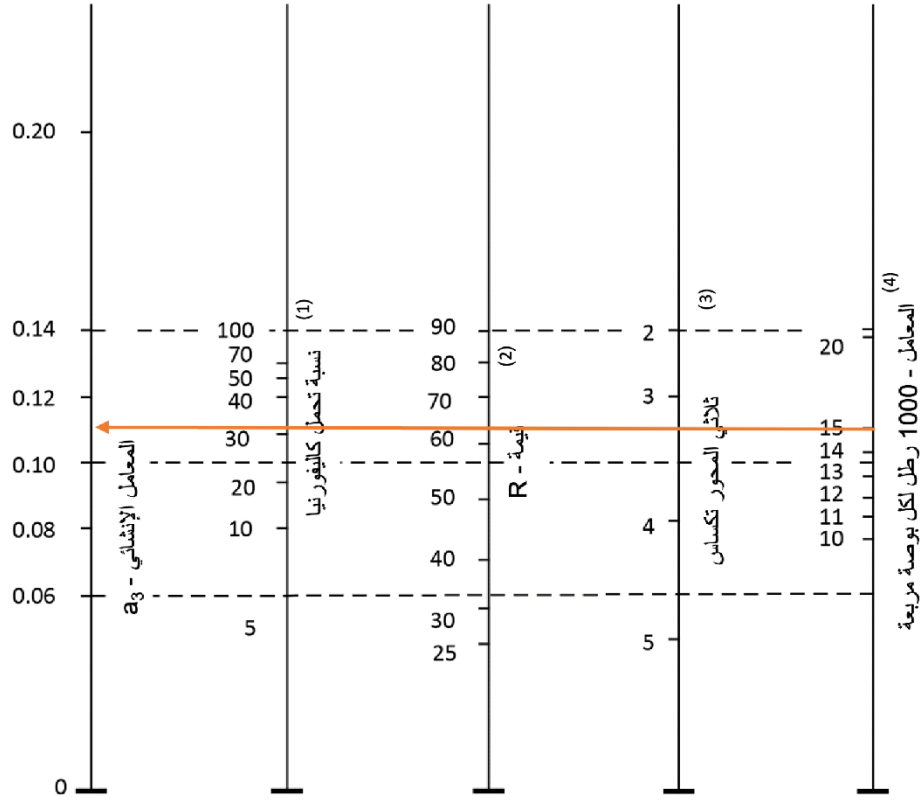
معامل المرونة، E_{AC} (رطل لكل بوصة مربعة) للطبقة
للخرسانة الأسفلتية عند ٢٠ درجة مئوية (٦٨ فهرنهايت)

الشكل (ج–٢) مثال لتقدير معامل الطبقة الإنشائية للخرسانة الأسفلتية كثيفة التدرج.



(1) المقياس المحسوب بحساب متوسط معاملات الترابط مع ليندوي.
(2) المقياس المحسوب بحساب متوسط معاملات الترابط المتحصل عليها من كاليفورنيا، نيومكسيكو ووايومنغ.
(3) المقياس المحسوب حساب متوسط معاملات الترابط مع تكساس.
(4) المقياس المحسوب من مشروع البرنامج الوطني للأبحاث التعاونية للطرق.

الشكل (ج–٣) مثال لتقدير معامل طبقة الأساس الحبيبية (a2).



(1) المقياس المحسوب بحساب متوسط معاملات الترابط مع لينوي.
(2) المقياس المحسوب بحساب متوسط معاملات الترابط المتحصل عليها من معهد الأسفلت، كاليفورنيا، نيومكسيكو ووايومنغ.
(3) المقياس المحسوب حساب متوسط معاملات الترابط مع تكساس.
(4) المقياس المحسوب من مشروع البرنامج الوطني للأبحاث التعاونية للطرق.

الشكل (ج–٤) مثال لتقدير معامل طبقة ما تحت الأساس الحبيبية (a3).

٧- حدد عوامل معامل الصرف من الجدول (٥-١٠) والجدول (٥-١١). على سبيل المثال، إذا كانت المياه تُنزح خلال يوم واحد، فإن جودة الصرف جيدة (الجدول ٥-١٠). بمعلومية أن النسبة الزمنية التي يتعرض فيها الهيكل الإنشائي للرصف لمستويات الرطوبة التي قد تصل للتشبع هي ٢٥٪ (الجدول ٥-١١)، فإن معامل () هو محصور بين (١،١٥) و (١،٠٠) (الجدول ٥-١١). وتؤخذ قيمة (١،٠٠) في الحسبان.

٨- حدد سماكة الطبقة باستخدام المعادلات من (٥-١٢) إلى (٥-١٧).

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{3,4}{0,44} = 7,7 \rightarrow D_1^* = 8\ in\ (200\ mm)$$

$$SN_1^* = a_1 \times D_1^* = 0,44 \times 8 = 3,52 \geq SN_1$$

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 \times m_2} = \frac{4,5 - 3,52}{0,14 \times 1,00} = 7 \rightarrow D_2^* = 7\ in\ (180\ mm)$$

$$SN_2^* = \mathrm{a}_2 \times m_2 \times D_2^* = 0.14 \times 1.00 \times 7 = 0.98$$

$$SN_1^* + SN_2^* = SN_2$$

$$D_3 = \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{\mathrm{a}_3 \times m_3} = \frac{5{,}3 - (3{,}52 + 0{,}98)}{0{,}11 \times 1{,}00} = 7{,}27 \ \rightarrow 7{,}5\ in\ (190\ mm)$$

٩- تحقق من استيفاء الحد الأدنى من متطلبات السمك وفقًا للجدول (٥-١٢).
١٠- حدد القطاع العرضي النهائي للرصف:

الطبقة السطحية (طبقات أسفلتية) D_1= ٢٠٠ ملم (٨ بوصة)، E_1= ٣,١٠٠ ميجا باسكال (٤٥٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)
طبقة الأساس (ركام غير مترابط) D_2= ١٨٠ ملم (٧ بوصة)، E_2= ٢٠٧ ميجا باسكال (٣٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)
طبقة ما تحت الأساس (ركام غير مترابط) D_3= ١٩٠ ملم (٧.٥ بوصة)، E_3= ١٠٣ ميجا باسكال (١٥,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)
طبقة القاعدة الترابية E_4= ٧٠ ميجا باسكال (١٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)

الشكل (ج–٥) مثال للقطاع العرضي النهائي للرصف المرن.

الملحق د - عوامل تكافؤ الأحمال للتصميم الإنشائي للرصف الصلب:

الجدول (د–١) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢
٤	١,٨١	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
٦	٢,٧٢	٠,٠١١	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠
٨	٣,٦٩	٠,٠٣٥	٠,٠٣٣	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢
١٠	٤,٥٤	٠,٠٨٧	٠,٠٨٤	٠,٠٨٢	٠,٠٨١	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠
١٢	٥,٤٤	٠,١٨٦	٠,١٨٠	٠,١٧٦	٠,١٧٥	٠,١٧٤	٠,١٧٤	٠,١٧٣	٠,١٧٣	٠,١٧٣
١٤	٦,٣٥	٠,٣٥٣	٠,٣٤٦	٠,٣٤١	٠,٣٣٨	٠,٣٣٧	٠,٣٣٦	٠,٣٣٦	٠,٣٣٦	٠,٣٣٦
١٦	٧,٢٦	٠,٦١٤	٠,٦٠٩	٠,٦٠٤	٠,٦٠١	٠,٥٩٩	٠,٥٩٩	٠,٥٩٨	٠,٥٩٨	٠,٥٩٨
١٨	٨,١٦	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠
٢٠	٩,٠٧	١,٥٥	١,٥٦	١,٥٧	١,٥٨	١,٥٨	١,٥٩	١,٥٩	١,٥٩	١,٥٩
٢٢	٩,٩٨	٢,٣٢	٢,٣٢	٢,٣٥	٢,٣٨	٢,٤٠	٢,٤١	٢,٤١	٢,٤١	٢,٤٢
٢٤	١٠,٨٩	٣,٣٧	٣,٣٤	٣,٤٠	٣,٤٧	٣,٥١	٣,٥٣	٣,٥٤	٣,٥٥	٣,٥٥
٢٦	١١,٧٩	٤,٧٦	٤,٦٩	٤,٧٧	٤,٨٨	٤,٩٧	٥,٠٢	٥,٠٤	٥,٠٦	٥,٠٦
٢٨	١٢,٧	٦,٥٨	٦,٤٤	٦,٥٢	٦,٧٠	٦,٨٥	٦,٩٤	٧,٠٠	٧,٠٢	٧,٠٤
٣٠	١٣,٦١	٨,٩٢	٨,٦٨	٨,٧٤	٨,٩٨	٩,٢٣	٩,٣٩	٩,٤٨	٩,٥٤	٩,٥٦
٣٢	١٤,٥١	١١,٩	١١,٥	١١,٥	١١,٨	١٢,٢	١٢,٤	١٢,٦	١٢,٧	١٢,٧
٣٤	١٥,٤٢	١٥,٥	١٥,٠	١٤,٩	١٥,٣	١٥,٨	١٦,٢	١٦,٤	١٦,٦	١٦,٧
٣٦	١٦,٣٣	٢٠,١	١٩,٣	١٩,٢	١٩,٥	٢٠,١	٢٠,٧	٢١,١	٢١,٤	٢١,٥
٣٨	١٧,٢٤	٢٥,٦	٢٤,٥	٢٤,٣	٢٤,٦	٢٥,٤	٢٦,١	٢٦,٧	٢٧,١	٢٧,٤
٤٠	١٨,١٤	٣٢,٢	٣٠,٨	٣٠,٤	٣٠,٧	٣١,٦	٣٢,٦	٣٣,٤	٣٤,٠	٣٤,٤
٤٢	١٩,٠٥	٤٠,١	٣٨,٤	٣٧,٧	٣٨,٠	٣٨,٩	٤٠,١	٤١,٣	٤٢,١	٤٢,٧
٤٤	١٩,٩٦	٤٩,٤	٤٧,٣	٤٦,٤	٤٦,٦	٤٧,٦	٤٩,٠	٥٠,٤	٥١,٦	٥٢,٤
٤٦	٢٠,٨٦	٦٠,٤	٥٧,٧	٥٦,٦	٥٦,٧	٥٧,٧	٥٩,٣	٦١,١	٦٢,٦	٦٣,٧
٤٨	٢١,٧٧	٧٣,٢	٦٩,٩	٦٨,٤	٦٨,٤	٦٩,٤	٧١,٢	٧٣,٣	٧٥,٣	٧٦,٨
٥٠	٢٢,٦٨	٨٨,٠	٨٤,١	٨٢,٢	٨٢,٠	٨٣,٠	٨٤,٩	٨٧,٤	٨٩,٨	٩١,٧

الجدول (د–٢) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١
٤	١,٨١	٠,٠٠٠٦	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥
٦	٢,٧٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٦	٠,٠٠٦	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥
١٠	٤,٥٤	٠,٠١٤	٠,٠١٣	٠,٠١٣	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٢
١٢	٥,٤٤	٠,٠٢٨	٠,٠٢٦	٠,٠٢٦	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥
١٤	٦,٣٥	٠,٠٥١	٠,٠٤٩	٠,٠٤٨	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧
١٦	٧,٢٦	٠,٠٨٧	٠,٠٨٤	٠,٠٨٢	٠,٠٨١	٠,٠٨١	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠
١٨	٨,١٦	٠,١٤١	٠,١٣٦	٠,١٣٣	٠,١٣٢	٠,١٣١	٠,١٣١	٠,١٣١	٠,١٣١	٠,١٣١
٢٠	٩,٠٧	٠,٢١٦	٠,٢١٠	٠,٢٠٦	٠,٢٠٤	٠,٢٠٣	٠,٢٠٣	٠,٢٠٣	٠,٢٠٣	٠,٢٠٣
٢٢	٩,٩٨	٠,٣١٩	٠,٣١٣	٠,٣٠٧	٠,٣٠٥	٠,٣٠٤	٠,٣٠٣	٠,٣٠٣	٠,٣٠٣	٠,٣٠٣
٢٤	١٠,٨٩	٠,٤٥٤	٠,٤٤٩	٠,٤٤٤	٠,٤٤١	٠,٤٤٠	٠,٤٣٩	٠,٤٣٩	٠,٤٣٩	٠,٤٣٩
٢٦	١١,٧٩	٠,٦٢٩	٠,٦٢٦	٠,٦٢٢	٠,٦٢٠	٠,٦١٨	٠,٦١٨	٠,٦١٨	٠,٦١٨	٠,٦١٨
٢٨	١٢,٧	٠,٨٥٢	٠,٨٥١	٠,٨٥٠	٠,٨٥٠	٠,٨٥٠	٠,٨٤٩	٠,٨٤٩	٠,٨٤٩	٠,٨٤٩
٣٠	١٣,٦١	١,١٣	١,١٣	١,١٤	١,١٤	١,١٤	١,١٤	١,١٤	١,١٤	١,١٤
٣٢	١٤,٥١	١,٤٨	١,٤٨	١,٤٩	١,٥٠	١,٥١	١,٥١	١,٥١	١,٥١	١,٥١
٣٤	١٥,٤٢	١,٩٠	١,٩٠	١,٩٣	١,٩٥	١,٩٦	١,٩٧	١,٩٧	١,٩٧	١,٩٧
٣٦	١٦,٣٣	٢,٤٢	٢,٤١	٢,٤٥	٢,٤٩	٢,٥١	٢,٥٢	٢,٥٣	٢,٥٣	٢,٥٣
٣٨	١٧,٢٤	٣,٠٤	٣,٠٢	٣,٠٧	٣,١٣	٣,١٧	٣,١٩	٣,٢٠	٣,٢٠	٣,٢١
٤٠	١٨,١٤	٣,٧٩	٣,٧٤	٣,٨٠	٣,٨٩	٣,٩٥	٣,٩٨	٤,٠٠	٤,٠١	٤,٠١
٤٢	١٩,٠٥	٤,٦٧	٤,٥٩	٤,٦٦	٤,٧٨	٤,٨٧	٤,٩٣	٤,٩٥	٤,٩٧	٤,٩٧
٤٤	١٩,٩٦	٥,٧٢	٥,٥٩	٥,٦٧	٥,٨٢	٥,٩٥	٦,٠٣	٦,٠٧	٦,٠٩	٦,١٠
٤٦	٢٠,٨٦	٦,٩٤	٦,٧٦	٦,٨٣	٧,٠٢	٧,٢٠	٧,٣١	٧,٣٧	٧,٤١	٧,٤٣
٤٨	٢١,٧٧	٨,٣٦	٨,١٢	٨,١٧	٨,٤٠	٨,٦٣	٨,٧٩	٨,٨٨	٨,٩٣	٨,٩٦
٥٠	٢٢,٦٨	١٠,٠٠	٩,٦٩	٩,٧٢	٩,٩٨	١٠,٢٧	١٠,٤٩	١٠,٦٢	١٠,٦٩	١٠,٧٣
٥٢	٢٣,٥٩	١١,٩	١١,٥	١١,٥	١١,٨	١٢,١	١٢,٤	١٢,٦	١٢,٧	١٢,٨
٥٤	٢٤,٤٩	١٤,٠	١٣,٥	١٣,٥	١٣,٨	١٤,٢	١٤,٦	١٤,٩	١٥,٠	١٥,١
٥٦	٢٥,٤٠	١٦,٥	١٥,٩	١٥,٨	١٦,١	١٦,٦	١٧,١	١٧,٤	١٧,٦	١٧,٧
٥٨	٢٦,٣١	١٩,٣	١٨,٥	١٨,٤	١٨,٧	١٩,٣	١٩,٨	٢٠,٣	٢٠,٥	٢٠,٧
٦٠	٢٧,٢٢	٢٢,٤	٢١,٥	٢١,٣	٢١,٦	٢٢,٣	٢٢,٩	٢٣,٥	٢٣,٨	٢٤,٠
٦٢	٢٨,١٢	٢٥,٩	٢٤,٩	٢٤,٦	٢٤,٩	٢٥,٦	٢٦,٤	٢٧,٠	٢٧,٥	٢٧,٧
٦٤	٢٩,٠٣	٢٩,٩	٢٨,٦	٢٨,٢	٢٨,٥	٢٩,٣	٣٠,٢	٣١,٠	٣١,٦	٣١,٩

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٦٦	٢٩,٩٤	٣٤,٣	٣٢,٨	٣٢,٣	٣٢,٦	٣٣,٤	٣٤,٤	٣٥,٤	٣٦,١	٣٦,٥
٦٨	٣٠,٨٤	٣٩,٢	٣٧,٥	٣٦,٨	٣٧,١	٣٧,٩	٣٩,١	٤٠,٢	٤١,١	٤١,٦
٧٠	٣١,٧٥	٤٤,٦	٤٢,٧	٤١,٩	٤٢,١	٤٢,٩	٤٤,٢	٤٥,٥	٤٦,٦	٤٧,٣
٧٢	٣٢,٦٦	٥٠,٦	٤٨,٤	٤٧,٥	٤٧,٦	٤٨,٥	٤٩,٩	٥١,٤	٥٢,٦	٥٣,٥
٧٤	٣٣,٥٧	٥٧,٣	٥٤,٧	٥٣,٦	٥٣,٦	٥٤,٦	٥٦,١	٥٧,٧	٥٩,٢	٦٠,٣
٧٦	٣٤,٤٧	٦٤,٦	٦١,٧	٦٠,٤	٦٠,٣	٦١,٢	٦٢,٨	٦٤,٧	٦٦,٤	٦٧,٧
٧٨	٣٥,٣٨	٧٢,٥	٦٩,٣	٦٧,٨	٦٧,٧	٦٨,٦	٧٠,٢	٧٢,٣	٧٤,٣	٧٥,٨
٨٠	٣٦,٢٩	٨١,٣	٧٧,٦	٧٥,٩	٧٥,٧	٧٦,٦	٧٨,٣	٨٠,٦	٨٢,٨	٨٤,٧
٨٢	٣٧,١٩	٩٠,٩	٨٦,٧	٨٤,٧	٨٤,٤	٨٥,٣	٨٧,١	٨٩,٦	٩٢,١	٩٤,٢
٨٤	٣٨,١٠	١٠١	٩٧	٩٤	٩٤	٩٥	٩٧	٩٩	١٠٢	١٠٥
٨٦	٣٩,٠	١١٣	١٠٧	١٠٥	١٠٤	١٠٥	١٠٧	١١٠	١١٣	١١٦
٨٨	٣٩,٩٢	١٢٥	١١٩	١١٦	١١٦	١١٦	١١٨	١٢١	١٢٥	١٢٨
٩٠	٤٠,٨٢	١٣٨	١٣٢	١٢٩	١٢٨	١٢٩	١٣١	١٣٤	١٣٧	١٤١

الجدول (د–٣) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١
٤	١,٨١	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣
٦	٢,٧٢	٠,٠٠١٠	٠,٠٠٠٩	٠,٠٠٠٩	٠,٠٠٠٩	٠,٠٠٠٩	٠,٠٠٠٩	٠,٠٠٠٩	٠,٠٠٠٩	٠,٠٠٠٩
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
١٠	٤,٥٤	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥
١٢	٥,٤٤	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩
١٤	٦,٣٥	٠,٠١٨	٠,٠١٧	٠,٠١٧	٠,٠١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٦
١٦	٧,٢٦	٠,٠٣٠	٠,٠٢٩	٠,٠٢٨	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧
١٨	٨,١٦	٠,٠٤٧	٠,٠٤٥	٠,٠٤٤	٠,٠٤٤	٠,٠٤٣	٠,٠٤٣	٠,٠٤٣	٠,٠٤٣	٠,٠٤٣
٢٠	٩,٠٧	٠,٠٧٢	٠,٠٦٩	٠,٠٦٧	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦
٢٢	٩,٩٨	٠,١٠٥	٠,١٠١	٠,٠٩٩	٠,٠٩٨	٠,٠٩٧	٠,٠٩٧	٠,٠٩٧	٠,٠٩٧	٠,٠٩٧
٢٤	١٠,٨٩	٠,١٤٩	٠,١٤٤	٠,١٤١	٠,١٣٩	٠,١٣٩	٠,١٣٨	٠,١٣٨	٠,١٣٨	٠,١٣٨
٢٦	١١,٧٩	٠,٢٠٥	٠,١٩٩	٠,١٩٥	٠,١٩٤	٠,١٩٣	٠,١٩٢	٠,١٩٢	٠,١٩٢	٠,١٩٢
٢٨	١٢,٧	٠,٢٧٦	٠,٢٧٠	٠,٢٦٥	٠,٢٦٣	٠,٢٦٢	٠,٢٦٢	٠,٢٦٢	٠,٢٦٢	٠,٢٦١
٣٠	١٣,٦١	٠,٣٦٤	٠,٣٥٩	٠,٣٥٤	٠,٣٥١	٠,٣٥٠	٠,٣٤٩	٠,٣٤٩	٠,٣٤٩	٠,٣٤٩

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٣٢	١٤,٥١	٠,٤٧٢	٠,٤٦٨	٠,٤٦٣	٠,٤٦٠	٠,٤٥٩	٠,٤٥٨	٠,٤٥٨	٠,٤٥٨	٠,٤٥٨
٣٤	١٥,٤٢	٠,٦٠٣	٠,٦٠٠	٠,٥٩٦	٠,٥٩٤	٠,٥٩٣	٠,٥٩٢	٠,٥٩٢	٠,٥٩٢	٠,٥٩٢
٣٦	١٦,٣٣	٠,٧٥٩	٠,٧٥٨	٠,٧٥٧	٠,٧٥٦	٠,٧٥٥	٠,٧٥٥	٠,٧٥٥	٠,٧٥٥	٠,٧٥٥
٣٨	١٧,٢٤	٠,٩٤٦	٠,٩٤٧	٠,٩٤٩	٠,٩٥٠	٠,٩٥١	٠,٩٥١	٠,٩٥١	٠,٩٥١	٠,٩٥١
٤٠	١٨,١٤	١,١٧	١,١٧	١,١٨	١,١٨	١,١٨	١,١٨	١,١٨	١,١٨	١,١٩
٤٢	١٩,٠٥	١,٤٢	١,٤٣	١,٤٤	١,٤٥	١,٤٦	١,٤٦	١,٤٦	١,٤٦	١,٤٦
٤٤	١٩,٩٦	١,٧٣	١,٧٣	١,٧٥	١,٧٧	١,٧٨	١,٧٨	١,٧٩	١,٧٩	١,٧٩
٤٦	٢٠,٨٦	٢,٠٨	٢,٠٧	٢,١٠	٢,١٣	٢,١٥	٢,١٦	٢,١٦	٢,١٦	٢,١٧
٤٨	٢١,٧٧	٢,٤٨	٢,٤٧	٢,٥١	٢,٥٥	٢,٥٨	٢,٥٩	٢,٦٠	٢,٦٠	٢,٦١
٥٠	٢٢,٦٨	٢,٩٥	٢,٩٢	٢,٩٧	٣,٠٣	٣,٠٧	٣,٠٩	٣,١٠	٣,١١	٣,١١
٥٢	٢٣,٥٩	٣,٤٨	٣,٤٤	٣,٥٠	٣,٥٨	٣,٦٣	٣,٦٦	٣,٦٨	٣,٦٩	٣,٦٩
٥٤	٢٤,٤٩	٤,٠٩	٤,٠٣	٤,٠٩	٤,٢٠	٤,٢٧	٤,٣١	٤,٣٣	٤,٣٥	٤,٣٥
٥٦	٢٥,٤٠	٤,٧٨	٤,٦٩	٤,٧٦	٤,٨٩	٤,٩٩	٥,٠٥	٥,٠٨	٥,٠٩	٥,١٠
٥٨	٢٦,٣١	٥,٥٧	٥,٤٤	٥,٥١	٥,٦٦	٥,٧٩	٥,٨٧	٥,٩١	٥,٩٤	٥,٩٥
٦٠	٢٧,٢٢	٦,٤٥	٦,٢٩	٦,٣٥	٦,٥٣	٦,٦٩	٦,٧٩	٦,٨٥	٦,٨٨	٦,٩٠
٦٢	٢٨,١٢	٧,٤٣	٧,٢٣	٧,٢٨	٧,٤٩	٧,٦٩	٧,٨٢	٧,٩٠	٧,٩٤	٧,٩٧
٦٤	٢٩,٠٣	٨,٥٤	٨,٢٨	٨,٣٢	٨,٥٥	٨,٨٠	٨,٩٧	٩,٠٧	٩,١٣	٩,١٦
٦٦	٢٩,٩٤	٩,٧٦	٩,٤٦	٩,٤٨	٩,٧٣	١٠,٠٢	١٠,٢٤	١٠,٣٧	١٠,٤٤	١٠,٤٨
٦٨	٣٠,٨٤	١١,١	١٠,٨	١٠,٨	١١,٠	١١,٤	١١,٦	١١,٨	١١,٩	١٢,٠
٧٠	٣١,٧٥	١٢,٦	١٢,٢	١٢,٢	١٢,٥	١٢,٨	١٣,٢	١٣,٤	١٣,٥	١٣,٦
٧٢	٣٢,٦٦	١٤,٣	١٣,٨	١٣,٧	١٤,٠	١٤,٥	١٤,٩	١٥,١	١٥,٣	١٥,٤
٧٤	٣٣,٥٧	١٦,١	١٥,٥	١٥,٤	١٥,٧	١٦,٢	١٦,٧	١٧,٠	١٧,٢	١٧,٣
٧٦	٣٤,٤٧	١٨,٢	١٧,٥	١٧,٣	١٧,٦	١٨,٢	١٨,٧	١٩,١	١٩,٣	١٩,٥
٧٨	٣٥,٣٨	٢٠,٤	١٩,٦	١٩,٤	١٩,٧	٢٠,٣	٢٠,٩	٢١,٤	٢١,٧	٢١,٨
٨٠	٣٦,٢٩	٢٢,٨	٢١,٩	٢١,٦	٢١,٩	٢٢,٦	٢٣,٣	٢٣,٨	٢٤,٢	٢٤,٤
٨٢	٣٧,١٩	٢٥,٤	٢٤,٤	٢٤,١	٢٤,٤	٢٥,٠	٢٥,٨	٢٦,٥	٢٦,٩	٢٧,٢
٨٤	٣٨,١٠	٢٨,٣	٢٧,١	٢٦,٧	٢٧,٠	٢٧,٧	٢٨,٦	٢٩,٤	٢٩,٩	٣٠,٢
٨٦	٣٩,٠	٣١,٤	٣٠,١	٢٩,٦	٢٩,٩	٣٠,٧	٣١,٦	٣٢,٥	٣٣,١	٣٣,٥
٨٨	٣٩,٩٢	٣٤,٨	٣٣,٣	٣٢,٨	٣٣,٠	٣٣,٨	٣٤,٨	٣٥,٨	٣٦,٦	٣٧,١
٩٠	٤٠,٨٢	٣٨,٥	٣٦,٨	٣٦,٢	٣٦,٤	٣٧,٢	٣٨,٣	٣٩,٤	٤٠,٣	٤٠,٩

الجدول (د–٤) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993).

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢
٤	١,٨١	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
٦	٢,٧٢	٠,٠١٢	٠,٠١١	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠
٨	٣,٦٩	٠,٠٣٩	٠,٠٣٥	٠,٠٣٣	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢
١٠	٤,٥٤	٠,٠٩٧	٠,٠٨٩	٠,٠٨٤	٠,٠٨٢	٠,٠٨١	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠
١٢	٥,٤٤	٠,٢٠٣	٠,١٨٩	٠,١٨١	٠,١٧٦	٠,١٧٥	٠,١٧٤	٠,١٧٤	٠,١٧٣	٠,١٧٣
١٤	٦,٣٥	٠,٣٧٦	٠,٣٦٠	٠,٣٤٧	٠,٣٤١	٠,٣٣٨	٠,٣٣٧	٠,٣٣٦	٠,٣٣٦	٠,٣٣٦
١٦	٧,٢٦	٠,٦٣٤	٠,٦٢٣	٠,٦١٠	٠,٦٠٤	٠,٦٠١	٠,٥٩٩	٠,٥٩٩	٠,٥٩٩	٠,٥٩٨
١٨	٨,١٦	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠
٢٠	٩,٠٧	١,٥١	١,٥٢	١,٥٥	١,٥٧	١,٥٨	١,٥٨	١,٥٩	١,٥٩	١,٥٩
٢٢	٩,٩٨	٢,٢١	٢,٢٠	٢,٢٨	٢,٣٤	٢,٣٨	٢,٤٠	٢,٤١	٢,٤١	٢,٤١
٢٤	١٠,٨٩	٣,١٦	٣,١٠	٣,٢٢	٣,٣٦	٣,٤٥	٣,٥٠	٣,٥٣	٣,٥٤	٣,٥٥
٢٦	١١,٧٩	٤,٤١	٤,٢٦	٤,٤٢	٤,٦٧	٤,٨٥	٤,٩٥	٥,٠١	٥,٠٤	٥,٠٥
٢٨	١٢,٧	٦,٠٥	٥,٧٦	٥,٩٢	٦,٢٩	٦,٦١	٦,٨١	٦,٩٢	٦,٩٨	٧,٠١
٣٠	١٣,٦١	٨,١٦	٧,٦٧	٧,٧٩	٨,٢٨	٨,٧٩	٩,١٤	٩,٣٥	٩,٤٦	٩,٥٢
٣٢	١٤,٥١	١٠,٨	١٠,١	١٠,١	١٠,٧	١١,٤	١٢,٠	١٢,٣	١٢,٦	١٢,٧
٣٤	١٥,٤٢	١٤,١	١٣,٠	١٢,٩	١٣,٦	١٤,٦	١٥,٤	١٦,٠	١٦,٤	١٦,٥
٣٦	١٦,٣٣	١٨,٢	١٦,٧	١٦,٤	١٧,١	١٨,٣	١٩,٥	٢٠,٤	٢١,٠	٢١,٣
٣٨	١٧,٢٤	٢٣,١	٢١,١	٢٠,٦	٢١,٣	٢٢,٧	٢٤,٣	٢٥,٦	٢٦,٤	٢٧,٠
٤٠	١٨,١٤	٢٩,١	٢٦,٥	٢٥,٧	٢٦,٣	٢٧,٩	٢٩,٩	٣١,٦	٣٢,٩	٣٣,٧
٤٢	١٩,٠٥	٣٦,٢	٣٢,٩	٣١,٧	٣٢,٢	٣٤,٠	٣٦,٣	٣٨,٧	٤٠,٤	٤١,٦
٤٤	١٩,٩٦	٤٤,٦	٤٠,٤	٣٨,٨	٣٩,٢	٤١,٠	٤٣,٨	٤٦,٧	٤٩,١	٥٠,٨
٤٦	٢٠,٨٦	٥٤,٥	٤٩,٣	٤٧,١	٤٧,٣	٤٩,٢	٥٢,٣	٥٥,٩	٥٩,٠	٦١,٤
٤٨	٢١,٧٧	٦٦,١	٥٩,٧	٥٦,٩	٥٦,٨	٥٨,٧	٦٢,١	٦٦,٣	٧٠,٣	٧٣,٤
٥٠	٢٢,٦٨	٧٩,٤	٧١,٧	٦٨,٢	٦٧,٨	٦٩,٦	٧٣,٣	٧٨,١	٨٣,٠	٨٧,١

الجدول (د–٥) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993).

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١
٤	١,٨١	٠,٠٠٠٦	٠,٠٠٠٦	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥
٦	٢,٧٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٧	٠,٠٠٦	٠,٠٠٦	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥
١٠	٤,٥٤	٠,٠١٥	٠,٠١٤	٠,٠١٣	٠,٠١٣	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٢
١٢	٥,٤٤	٠,٠٣١	٠,٠٢٨	٠,٠٢٦	٠,٠٢٦	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥
١٤	٦,٣٥	٠,٠٥٧	٠,٠٥٢	٠,٠٤٩	٠,٠٤٨	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧
١٦	٧,٢٦	٠,٠٩٧	٠,٠٨٩	٠,٠٨٤	٠,٠٨٢	٠,٠٨١	٠,٠٨١	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠
١٨	٨,١٦	٠,١٥٥	٠,١٤٣	٠,١٣٦	٠,١٣٣	٠,١٣٢	٠,١٣١	٠,١٣١	٠,١٣١	٠,١٣١
٢٠	٩,٠٧	٠,٢٣٤	٠,٢٢٠	٠,٢١١	٠,٢٠٦	٠,٢٠٤	٠,٢٠٣	٠,٢٠٣	٠,٢٠٣	٠,٢٠٣
٢٢	٩,٩٨	٠,٣٤٠	٠,٣٢٥	٠,٣١٣	٠,٣٠٨	٠,٣٠٥	٠,٣٠٤	٠,٣٠٣	٠,٣٠٣	٠,٣٠٣
٢٤	١٠,٨٩	٠,٤٧٥	٠,٤٦٢	٠,٤٥٠	٠,٤٤٤	٠,٤٤١	٠,٤٤٠	٠,٤٣٩	٠,٤٣٩	٠,٤٣٩
٢٦	١١,٧٩	٠,٦٤٤	٠,٦٣٧	٠,٦٢٧	٠,٦٢٢	٠,٦٢٠	٠,٦١٩	٠,٦١٨	٠,٩١٨	٠,٦١٨
٢٨	١٢,٧	٠,٨٥٥	٠,٨٥٤	٠,٨٥٢	٠,٨٥٠	٠,٨٥٠	٠,٨٥٠	٠,٨٤٩	٠,٨٤٩	٠,٨٤٩
٣٠	١٣,٦١	١,١١	١,١٢	١,١٣	١,١٤	١,١٤	١,١٤	١,١٤	١,١٤	١,١٤
٣٢	١٤,٥١	١,٤٣	١,٤٤	١,٤٧	١,٤٩	١,٥٠	١,٥١	١,٥١	١,٥١	١,٥١
٣٤	١٥,٤٢	١,٨٢	١,٨٢	١,٨٧	١,٩٢	١,٩٥	١,٩٦	١,٩٧	١,٩٧	١,٩٧
٣٦	١٦,٣٣	٢,٢٩	٢,٢٧	٢,٣٥	٢,٤٣	٢,٤٨	٢,٥١	٢,٥٢	٢,٥٢	٢,٥٣
٣٨	١٧,٢٤	٢,٨٥	٢,٨٠	٢,٩١	٣,٠٣	٣,١٢	٣,١٦	٣,١٨	٣,٢٠	٣,٢٠
٤٠	١٨,١٤	٣,٥٢	٣,٤٢	٣,٥٥	٣,٧٤	٣,٨٧	٣,٩٤	٣,٩٨	٤,٠٠	٤,٠١
٤٢	١٩,٠٥	٤,٣٢	٤,١٦	٤,٣٠	٤,٥٥	٤,٧٤	٤,٨٦	٤,٩١	٤,٩٥	٤,٩٦
٤٤	١٩,٩٦	٥,٢٦	٥,٠١	٥,١٦	٥,٤٨	٥,٧٥	٥,٩٢	٦,٠١	٦,٠٦	٦,٠٩
٤٦	٢٠,٨٦	٦,٣٦	٦,٠١	٦,١٤	٦,٥٣	٦,٩٠	٧,١٤	٧,٢٨	٧,٣٦	٧,٤٠
٤٨	٢١,٧٧	٧,٦٤	٧,١٦	٧,٢٧	٧,٧٣	٨,٢١	٨,٥٥	٨,٧٥	٨,٨٦	٨,٩٢
٥٠	٢٢,٦٨	٩,١١	٨,٥٠	٨,٥٥	٩,٠٧	٩,٦٨	١٠,١٤	١٠,٤٢	١٠,٥٨	١٠,٦٦
٥٢	٢٣,٥٩	١٠,٨	١٠,٠	١٠,٠	١٠,٦	١١,٣	١١,٩	١٢,٣	١٢,٥	١٢,٧
٥٤	٢٤,٤٩	١٢,٨	١١,٨	١١,٧	١٢,٣	١٣,٢	١٣,٩	١٤,٥	١٤,٨	١٤,٩
٥٦	٢٥,٤٠	١٥,٠	١٣,٨	١٣,٦	١٤,٢	١٥,٢	١٦,٢	١٦,٨	١٧,٣	١٧,٥
٥٨	٢٦,٣١	١٧,٥	١٦,٠	١٥,٧	١٦,٣	١٧,٥	١٨,٦	١٩,٥	٢٠,١	٢٠,٤
٦٠	٢٧,٢٢	٢٠,٣	١٨,٥	١٨,١	١٨,٧	٢٠,٠	٢١,٤	٢٢,٥	٢٣,٢	٢٣,٦
٦٢	٢٨,١٢	٢٣,٥	٢١,٤	٢٠,٨	٢١,٤	٢٢,٨	٢٤,٤	٢٥,٧	٢٦,٧	٢٧,٣
٦٤	٢٩,٠٣	٢٧,٠	٢٤,٦	٢٣,٨	٢٤,٤	٢٥,٨	٢٧,٧	٢٩,٣	٣٠,٥	٣١,٣

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٦٦	٢٩,٩٤	٣١,٠	٢٨,١	٢٧,١	٢٧,٦	٢٩,٢	٣١,٣	٣٣,٢	٣٤,٧	٣٥,٧
٦٨	٣٠,٨٤	٣٥,٤	٣٢,١	٣٠,٩	٣١,٣	٣٢,٩	٣٥,٢	٣٧,٥	٣٩,٣	٤٠,٥
٧٠	٣١,٧٥	٤٠,٣	٣٦,٥	٣٥,٠	٣٥,٣	٣٧,٠	٣٩,٥	٤٢,١	٤٤,٣	٤٥,٩
٧٢	٣٢,٦٦	٤٥,٧	٤١,٤	٣٩,٦	٣٩,٨	٤١,٥	٤٤,٢	٤٧,٢	٤٩,٨	٥١,٧
٧٤	٣٣,٥٧	٥١,٧	٤٦,٧	٤٤,٦	٤٤,٧	٤٦,٤	٤٩,٣	٥٢,٧	٥٥,٧	٥٨,٠
٧٦	٣٤,٤٧	٥٨,٣	٥٢,٦	٥٠,٢	٥٠,١	٥١,٨	٥٤,٩	٥٨,٦	٦٢,١	٦٤,٨
٧٨	٣٥,٣٨	٦٥,٥	٥٩,١	٥٦,٣	٥٦,١	٥٧,٧	٦٠,٩	٦٥,٠	٦٩,٠	٧٢,٣
٨٠	٣٦,٢٩	٧٣,٤	٦٦,٢	٦٢,٩	٦٢,٥	٦٤,٢	٦٧,٥	٧١,٩	٧٦,٤	٨٠,٢
٨٢	٣٧,١٩	٨٢,٠	٧٣,٩	٧٠,٢	٦٩,٦	٧١,٢	٧٤,٧	٧٩,٤	٨٤,٤	٨٨,٨
٨٤	٣٨,١٠	٩١,٤	٨٢,٤	٧٨,١	٧٧,٣	٧٨,٩	٨٢,٤	٨٧,٤	٩٣,٠	٩٨,١
٨٦	٣٩,٠	١٠٢	٩٢	٨٧	٨٦	٨٧	٩١	٩٦	١٠٢	١٠٨
٨٨	٣٩,٩٢	١١٣	١٠٢	٩٦	٩٥	٩٦	١٠٠	١٠٥	١١٢	١١٩
٩٠	٤٠,٨٢	١٢٥	١١٢	١٠٦	١٠٥	١٠٦	١١٠	١١٥	١٢٣	١٣٠

الجدول (د–٦) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٢,٥ (AASHTO,1993).

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١
٤	١,٨١	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣
٦	٢,٧٢	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
١٠	٤,٥٤	٠,٠٠٦	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥
١٢	٥,٤٤	٠,٠١١	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩
١٤	٦,٣٥	٠,٠٢٠	٠,٠١٨	٠,٠١٧	٠,٠١٧	٠,٠١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٦
١٦	٧,٢٦	٠,٠٣٣	٠,٠٣٠	٠,٠٢٩	٠,٠٢٨	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧
١٨	٨,١٦	٠,٠٥٣	٠,٠٤٨	٠,٠٤٥	٠,٠٤٤	٠,٠٤٤	٠,٠٤٣	٠,٠٤٣	٠,٠٤٣	٠,٠٤٣
٢٠	٩,٠٧	٠,٠٨٠	٠,٠٧٣	٠,٠٦٩	٠,٠٦٧	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦
٢٢	٩,٩٨	٠,١١٦	٠,١٠٧	٠,١٠١	٠,٠٩٩	٠,٠٩٨	٠,٠٩٧	٠,٠٩٧	٠,٠٩٧	٠,٠٩٧
٢٤	١٠,٨٩	٠,١٦٣	٠,١٥١	٠,١٤٤	٠,١٤١	٠,١٣٩	٠,١٣٩	٠,١٣٨	٠,١٣٨	٠,١٣٨
٢٦	١١,٧٩	٠,٢٢٢	٠,٢٠٩	٠,٢٠٠	٠,١٩٥	٠,١٩٤	٠,١٩٣	٠,١٩٢	٠,١٩٢	٠,١٩٢
٢٨	١٢,٧	٠,٢٩٥	٠,٢٨١	٠,٢٧١	٠,٢٦٥	٠,٢٦٣	٠,٢٦٢	٠,٢٦٢	٠,٢٦٢	٠,٢٦٢
٣٠	١٣,٦١	٠,٣٨٤	٠,٣٧١	٠,٣٥٩	٠,٣٥٤	٠,٣٥١	٠,٣٥٠	٠,٣٤٩	٠,٣٤٩	٠,٣٤٩

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٣٢	١٤,٥١	٠,٤٩٠	٠,٤٨٠	٠,٤٦٨	٠,٤٦٣	٠,٤٦٠	٠,٤٥٩	٠,٤٥٨	٠,٤٥٨	٠,٤٥٨
٣٤	١٥,٤٢	٠,٦١٦	٠,٦٠٩	٠,٦٠١	٠,٥٩٦	٠,٥٩٤	٠,٥٩٣	٠,٥٩٢	٠,٥٩٢	٠,٥٩٢
٣٦	١٦,٣٣	٠,٧٦٥	٠,٧٦٢	٠,٧٥٩	٠,٧٥٧	٠,٧٥٦	٠,٧٥٥	٠,٧٥٥	٠,٧٥٥	٠,٧٥٥
٣٨	١٧,٢٤	٠,٩٣٩	٠,٩٤١	٠,٩٤٦	٠,٩٤٨	٠,٩٥٠	٠,٩٥١	٠,٩٥١	٠,٩٥١	٠,٩٥١
٤٠	١٨,١٤	١,١٤	١,١٥	١,١٦	١,١٧	١,١٨	١,١٨	١,١٨	١,١٨١	١,١٨
٤٢	١٩,٠٥	١,٣٨	١,٣٨	١,٤١	١,٤٤	١,٤٥	١,٤٦	١,٤٦	١,٤٦	١,٤٦
٤٤	١٩,٩٦	١,٦٥	١,٦٥	١,٧٠	١,٧٤	١,٧٧	١,٧٨	١,٧٨	١,٧٨	١,٧٩
٤٦	٢٠,٨٦	١,٩٧	١,٩٦	٢,٠٣	٢٠,٩	٢,١٣	٢,١٥	٢,١٦	٢,١٦	٢,١٦
٤٨	٢١,٧٧	٢,٣٤	٢,٣١	٢,٤٠	٢,٤٩	٢,٥٥	٢,٥٨	٢,٥٩	٢,٦٠	٢,٦٠
٥٠	٢٢,٦٨	٢,٧٦	٢,٧١	٢,٨١	٢,٩٤	٣,٠٢	٣,٠٧	٣,٠٩	٣,١٠	٣,١١
٥٢	٢٣,٥٩	٣,٢٤	٣,١٥	٣,٢٧	٣,٤٤	٣,٥٦	٣,٦٢	٣,٦٦	٣,٦٨	٣,٦٨
٥٤	٢٤,٤٩	٣,٧٩	٣,٦٦	٣,٧٩	٤,٠٠	٤,١٦	٤,٢٦	٤,٣٠	٤,٣٣	٤,٣٤
٥٦	٢٥,٤٠	٤,٤١	٤,٢٣	٤,٣٧	٤,٦٣	٤,٨٤	٤,٩٧	٥,٠٣	٥,٠٧	٥,٠٩
٥٨	٢٦,٣١	٥,١٢	٤,٨٧	٥,٠٠	٥,٣٢	٥,٥٩	٥,٧٦	٥,٨٤	٥,٩٠	٥,٩٣
٦٠	٢٧,٢٢	٥,٩١	٥,٥٩	٥,٧١	٦,٠٨	٦,٤٢	٦,٦٤	٦,٧٧	٦,٨٤	٦,٨٧
٦٢	٢٨,١٢	٦,٨٠	٦,٣٩	٦,٥٠	٦,٩١	٧,٣٣	٧,٦٢	٧,٧٩	٧,٨٨	٧,٩٣
٦٤	٢٩,٠٣	٧,٧٩	٧,٢٩	٧,٣٧	٧,٨٢	٨,٣٣	٨,٧٠	٨,٩٢	٩,٠٤	٩,١١
٦٦	٢٩,٩٤	٨,٩٠	٨,٢٨	٨,٣٣	٨,٨٣	٩,٤٢	٩,٨٨	١٠,١٧	١٠,٣٣	١٠,٤٢
٦٨	٣٠,٨٤	١٠,١	٩,٤	٩,٤	٩,٩	١٠,٦	١١,٢	١١,٥	١١,٧	١١,٩
٧٠	٣١,٧٥	١١,٥	١٠,٦	١٠,٦	١١,١	١١,٩	١٢,٦	١٣,٠	١٣,٣	١٣,٥
٧٢	٣٢,٦٦	١٣,٠	١٢,٠	١١,٨	١٢,٤	١٣,٣	١٤,١	١٤,٧	١٥,٠	١٥,٢
٧٤	٣٣,٥٧	١٤,٦	١٣,٥	١٣,٢	١٣,٨	١٤,٨	١٥,٨	١٦,٥	١٦,٩	١٧,١
٧٦	٣٤,٤٧	١٦,٥	١٥,١	١٤,٨	١٥,٤	١٦,٥	١٧,٦	١٨,٤	١٨,٩	١٩,٢
٧٨	٣٥,٣٨	١٨,٥	١٦,٩	١٦,٥	١٧,١	١٨,٢	١٩,٥	٢٠,٥	٢١,١	٢١,٥
٨٠	٣٦,٢٩	٢٠,٦	١٨,٨	١٨,٣	١٨,٩	٢٠,٢	٢١,٦	٢٢,٧	٢٣,٥	٢٤,٠
٨٢	٣٧,١٩	٢٣,٠	٢١,٠	٢٠,٣	٢٠,٩	٢٢,٢	٢٣,٨	٢٥,٢	٢٦,١	٢٦,٧
٨٤	٣٨,١٠	٢٥,٦	٢٣,٣	٢٢,٥	٢٣,١	٢٤,٥	٢٦,٢	٢٧,٨	٢٨,٩	٢٩,٦
٨٦	٣٩,٠	٢٨,٤	٢٥,٣٨	٢٤,٩	٢٥,٤	٢٦,٦	٢٨,٨	٣٠,٥	٣١,٩	٣٢,٨
٨٨	٣٩,٩٢	٣١,٥	٢٨,٦	٢٧,٥	٢٧,٩	٢٩,٤	٣١,٥	٣٣,٥	٣٥,١	٣٦,١
٩٠	٤٠,٨٢	٣٤,٨	٣١,٥	٣٠,٣	٣٠,٧	٣٢,٢	٣٤,٤	٣٦,٧	٣٨,٥	٣٩,٨

الجدول (د–٧) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الأحادية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢	٠,٠٠٠٢
٤	١,٨١	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
٦	٢,٧٢	٠,٠١٤	٠,٠١٢	٠,٠١١	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠	٠,٠١٠
٨	٣,٦٩	٠,٠٤٥	٠,٠٣٨	٠,٠٣٤	٠,٠٣٣	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢	٠,٠٣٢
١٠	٤,٥٤	٠,١١١	٠,٠٩٥	٠,٠٨٧	٠,٠٨٣	٠,٠٨١	٠,٠٨١	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠
١٢	٥,٤٤	٠,٢٢٨	٠,٢٠٢	٠,١٨٦	٠,١٧٩	٠,١٧٦	٠,١٧٤	٠,١٧٤	٠,١٧٤	٠,١٧٣
١٤	٦,٣٥	٠,٤٠٨	٠,٣٧٨	٠,٣٥٥	٠,٣٤٤	٠,٣٤٠	٠,٣٣٧	٠,٣٣٧	٠,٣٣٦	٠,٣٣٦
١٦	٧,٢٦	٠,٦٦٠	٠,٦٤٠	٠,٦١٩	٠,٦٠٨	٠,٦٠٣	٠,٦٠٠	٠,٥٩٩	٠,٥٩٩	٠,٥٩٩
١٨	٨,١٦	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠
٢٠	٩,٠٧	١,٤٦	١,٤٧	١,٥٢	١,٥٥	١,٥٧	١,٥٨	١,٥٨	١,٥٩	١,٥٩
٢٢	٩,٩٨	٢,٠٧	٢,٠٦	٢,١٨	٢,٢٩	٢,٣٥	٢,٣٨	٢,٤٠	٢,٤١	٢,٤١
٢٤	١٠,٨٩	٢,٩٠	٢,٨١	٣,٠٠	٣,٢٣	٣,٣٨	٣,٤٧	٣,٥١	٣,٥٣	٣,٥٤
٢٦	١١,٧٩	٤,٠٠	٣,٧٧	٤,٠١	٤,٤٠	٤,٧٠	٤,٨٧	٤,٩٦	٥,٠١	٥,٠٤
٢٨	١٢,٧	٥,٤٣	٤,٩٩	٥,٢٣	٥,٨٠	٦,٣١	٦,٦٥	٦,٨٣	٦,٩٣	٦,٩٨
٣٠	١٣,٦١	٧,٢٧	٦,٥٣	٦,٧٢	٧,٤٦	٨,٢٥	٨,٨٣	٩,١٧	٩,٣٦	٩,٤٦
٣٢	١٤,٥١	٩,٥٩	٨,٤٧	٨,٥٣	٩,٤٢	١٠,٥٤	١١,٤٤	١٢,٠٣	١٢,٣٧	١٢,٥٦
٣٤	١٥,٤٢	١٢,٥	١٠,٩	١٠,٧	١١,٧	١٣,٢	١٤,٥	١٥,٥	١٦,٠	١٦,٤
٣٦	١٦,٣٣	١٦,٠	١٣,٨	١٣,٤	١٤,٤	١٦,٢	١٨,١	١٩,٥	٢٠,٤	٢١,٠
٣٨	١٧,٢٤	٢٠,٤	١٧,٤	١٦,٧	١٧,٧	١٩,٨	٢٢,٢	٢٤,٢	٢٥,٦	٢٦,٤
٤٠	١٨,١٤	٢٥,٦	٢١,٨	٢٠,٦	٢١,٥	٢٣,٨	٢٦,٨	٢٩,٥	٣١,٥	٣٢,٩
٤٢	١٩,٠٥	٣١,٨	٢٦,٩	٢٥,٣	٢٦,٠	٢٨,٥	٣٢,٠	٣٥,٥	٣٨,٤	٤٠,٣
٤٤	١٩,٩٦	٣٩,٢	٣٣,١	٣٠,٨	٣١,٣	٣٣,٩	٣٧,٩	٤٢,٣	٤٦,١	٤٨,٨
٤٦	٢٠,٨٦	٤٧,٨	٤٠,٣	٣٧,٢	٣٧,٥	٤٠,١	٤٤,٥	٤٩,٨	٥٤,٧	٥٨,٥
٤٨	٢١,٧٧	٥٧,٩	٤٨,٦	٤٤,٨	٤٤,٧	٤٧,٣	٥٢,١	٥٨,٢	٦٤,٣	٦٩,٤
٥٠	٢٢,٦٨	٦٩,٦	٥٨,٤	٥٣,٦	٥٣,١	٥٥,٦	٦٠,٦	٦٧,٦	٧٥,٠	٨١,٤

الجدول (د–٨) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور المزدوجة وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١
٤	١,٨١	٠,٠٠٠٧	٠,٠٠٠٦	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠٥
٦	٢,٧٢	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٨	٠,٠٠٦	٠,٠٠٦	٠,٠٠٦	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥
١٠	٤,٥٤	٠,٠١٨	٠,٠١٥	٠,٠١٣	٠,٠١٣	٠,٠١٣	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٢
١٢	٥,٤٤	٠,٠٣٦	٠,٠٣٠	٠,٠٢٧	٠,٠٢٦	٠,٠٢٦	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥	٠,٠٢٥
١٤	٦,٣٥	٠,٠٦٦	٠,٠٥٦	٠,٠٥٠	٠,٠٤٨	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧	٠,٠٤٧
١٦	٧,٢٦	٠,١١١	٠,٠٩٥	٠,٠٨٧	٠,٠٨٣	٠,٠٨١	٠,٠٨١	٠,٠٨١	٠,٠٨٠	٠,٠٨٠
١٨	٨,١٦	٠,١٧٤	٠,١٥٣	٠,١٤٠	٠,١٣٥	٠,١٣٢	٠,١٣١	٠,١٣١	٠,١٣١	٠,١٣١
٢٠	٩,٠٧	٠,٢٦٠	٠,٢٣٤	٠,٢١٧	٠,٢٠٩	٠,٢٠٥	٠,٢٠٤	٠,٢٠٣	٠,٢٠٣	٠,٢٠٣
٢٢	٩,٩٨	٠,٣٦٨	٠,٣٤١	٠,٣٢١	٠,٣١١	٠,٣٠٧	٠,٣٠٥	٠,٣٠٤	٠,٣٠٣	٠,٣٠٣
٢٤	١٠,٨٩	٠,٥٠٢	٠,٤٧٩	٠,٤٥٨	٠,٤٤٧	٠,٤٤٣	٠,٤٤٠	٠,٤٤٠	٠,٤٣٩	٠,٤٣٩
٢٦	١١,٧٩	٠,٦٦٤	٠,٦٥١	٠,٦٣٤	٠,٦٢٥	٠,٦٢١	٠,٦١٩	٠,٦١٨	٠,٦١٨	٠,٦١٨
٢٨	١٢,٧	٠,٨٥٩	٠,٨٥٧	٠,٨٥٣	٠,٨٥١	٠,٨٥٠	٠,٨٥٠	٠,٨٥٠	٠,٨٤٩	٠,٨٤٩
٣٠	١٣,٦١	١,٠٩	١,١٠	١,١٢	١,١٣	١,١٤	١,١٤	١,١٤	١,١٤	١,١٤
٣٢	١٤,٥١	١,٣٨	١,٣٨	١,٤٤	١,٤٧	١,٤٩	١,٥٠	١,٥١	١,٥١	١,٥١
٣٤	١٥,٤٢	١,٧٢	١,٧١	١,٨٠	١,٨٨	١,٩٣	١,٩٥	١,٩٦	١,٩٧	١,٩٧
٣٦	١٦,٣٣	٢,١٣	٢,١٠	٢,٢٣	٢,٣٦	٢,٤٥	٢,٤٩	٢,٥١	٢,٥٢	٢,٥٢
٣٨	١٧,٢٤	٢,٦٢	٢,٥٤	٢,٧١	٢,٩٢	٣٠,٦	٣,١٣	٣,١٧	٣,١٩	٣,٢٠
٤٠	١٨,١٤	٣,٢١	٣,٠٥	٣,٢٦	٣,٥٥	٣,٧٦	٣,٨٩	٣,٩٥	٣,٩٨	٤,٠٠
٤٢	١٩,٠٥	٣,٩٠	٣,٦٥	٣,٨٧	٤,٢٦	٤,٥٨	٤,٧٧	٤,٨٧	٤,٩٢	٤,٩٥
٤٤	١٩,٩٦	٤,٧٢	٤,٣٥	٤,٥٧	٥,٠٦	٥,٥٠	٥,٧٨	٥,٩٤	٦,٠٢	٦,٠٦
٤٦	٢٠,٨٦	٥,٦٨	٥,١٦	٥,٣٦	٥,٩٥	٦,٥٤	٦,٩٤	٧,١٧	٧,٢٩	٧,٣٦
٤٨	٢١,٧٧	٦,٨٠	٦,١٠	٦,٢٥	٦,٩٣	٧,٦٩	٨,٢٤	٨,٥٧	٨,٧٦	٨,٨٦
٥٠	٢٢,٦٨	٨,٠٩	٧,١٧	٧,٢٦	٨,٠٣	٨,٩٦	٩,٧٠	١٠,١٧	١٠,٤٣	١٠,٥٨
٥٢	٢٣,٥٩	٩,٥٧	٨,٤١	٨,٤٠	٩,٢٤	١٠,٣٦	١١,٣٢	١١,٩٦	١٢,٣٣	١٢,٥٤
٥٤	٢٤,٤٩	١١,٣	٩,٨	٩,٧	١٠,٦	١١,٩	١٣,١	١٤,٠	١٤,٥	١٤,٨
٥٦	٢٥,٤٠	١٣,٢	١١,٤	١١,٢	١٢,١	١٣,٦	١٥,١	١٦,٢	١٦,٩	١٧,٣
٥٨	٢٦,٣١	١٥,٤	١٣,٢	١٢,٨	١٣,٧	١٥,٤	١٧,٢	١٨,٦	١٩,٥	٢٠,١
٦٠	٢٧,٢٢	١٧,٩	١٥,٣	١٤,٧	١٥,٦	١٧,٤	١٩,٥	٢١,٣	٢٢,٥	٢٣,٢
٦٢	٢٨,١٢	٢٠,٦	١٧,٦	١٦,٨	١٧,٦	١٩,٦	٢٢,٠	٢٤,١	٢٥,٧	٢٦,٦
٦٤	٢٩,٠٣	٢٣,٧	٢٠,٢	١٩,١	١٩,٩	٢٢,٠	٢٤,٧	٢٧,٣	٢٩,٢	٣٠,٤

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٦٦	٢٩,٩٤	٢٧,٢	٢٣,١	٢١,٧	٢٢,٤	٢٤,٦	٢٧,٦	٣٠,٦	٣٣,٠	٣٤,٦
٦٨	٣٠,٨٤	٣١,١	٢٦,٣	٢٤,٦	٢٥,٢	٢٧,٤	٣٠,٨	٣٤,٣	٣٧,١	٣٩,٢
٧٠	٣١,٧٥	٣٥,٤	٢٩,٨	٢٧,٨	٢٨,٢	٣٠,٦	٣٤,٢	٣٨,٢	٤١,٦	٤٤,١
٧٢	٣٢,٦٦	٤٠,١	٣٣,٨	٣١,٣	٣١,٦	٣٤,٠	٣٧,٩	٤٢,٣	٤٦,٤	٤٩,٤
٧٤	٣٣,٥٧	٤٥,٣	٣٨,١	٣٥,٢	٣٥,٤	٣٧,٧	٤١,٨	٤٦,٨	٥١,٥	٥٥,٢
٧٦	٣٤,٤٧	٥١,١	٤٢,٩	٣٩,٥	٣٩,٥	٤١,٨	٤٦,١	٥١,٥	٥٦,٩	٦١,٣
٧٨	٣٥,٣٨	٥٧,٤	٤٨,٢	٤٤,٣	٤٤,٠	٤٦,٣	٥٠,٧	٥٦,٦	٦٢,٧	٦٧,٩
٨٠	٣٦,٢٩	٦٤,٣	٥٣,٩	٤٩,٤	٤٨,٩	٥١,١	٥٥,٨	٦٢,١	٦٨,٩	٧٤,٩
٨٢	٣٧,١٩	٧١,٨	٦٠,٢	٥٥,١	٥٤,٣	٥٦,٥	٦١,٢	٦٧,٩	٧٥,٥	٨٢,٤
٨٤	٣٨,١٠	٨٠,٠	٦٧,٠	٦١,٢	٦٠,٢	٦٢,٢	٦٧,٠	٧٤,٢	٨٢,٤	٩٠,٣
٨٦	٣٩,٠	٨٩,٠	٧٤,٥	٦٧,٩	٦٦,٥	٦٨,٥	٧٣,٤	٨٠,٨	٨٩,٨	٩٨,٧
٨٨	٣٩,٩٢	٩٨,٧	٨٢,٥	٧٥,٢	٧٣,٥	٧٥,٣	٨٠,٢	٨٨,٠	٩٧,٧	١٠٧,٥
٩٠	٤٠,٨٢	١٠٩	٩١	٨٣	٨١	٨٣	٨٨	٩٦	١٠٦	١١٧

الجدول (د–٩) عوامل تكافؤ الأحمال المحورية للرصفيات الصلبة والمحاور الثلاثية وقابلية الخدمة النهائية البالغة ٣,٠ (AASHTO,1993).

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٢	٠,٩٠٧	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١	٠,٠٠٠١
٤	١,٨١	٠,٠٠٠٤	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣	٠,٠٠٠٣
٦	٢,٧٢	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١	٠,٠٠١
٨	٣,٦٩	٠,٠٠٣	٠,٠٠٣	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٠٢
١٠	٤,٥٤	٠,٠٠٧	٠,٠٠٦	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥	٠,٠٠٥
١٢	٥,٤٤	٠,٠١٣	٠,٠١١	٠,٠١٠	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩	٠,٠٠٩
١٤	٦,٣٥	٠,٠٢٣	٠,٠٢٠	٠,٠١٨	٠,٠١٧	٠,٠١٧	٠,٠١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٦	٠,٠١٦
١٦	٧,٢٦	٠,٠٣٩	٠,٠٣٣	٠,٠٣٠	٠,٠٢٨	٠,٠٢٨	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧	٠,٠٢٧
١٨	٨,١٦	٠,٠٦١	٠,٠٥٢	٠,٠٤٧	٠,٠٤٥	٠,٠٤٤	٠,٠٤٤	٠,٠٤٣	٠,٠٤٣	٠,٠٤٣
٢٠	٩,٠٧	٠,٠٩١	٠,٠٧٨	٠,٠٧١	٠,٠٦٨	٠,٠٦٧	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦	٠,٠٦٦
٢٢	٩,٩٨	٠,١٣٢	٠,١١٤	٠,١٠٤	٠,١٠٠	٠,٠٩٨	٠,٠٩٧	٠,٠٩٧	٠,٠٩٧	٠,٠٩٧
٢٤	١٠,٨٩	٠,١٨٣	٠,١٦١	٠,١٤٨	٠,١٤٣	٠,١٤٠	٠,١٣٩	٠,١٣٩	٠,١٣٨	٠,١٣٨
٢٦	١١,٧٩	٠,٢٤٦	٠,٢٢١	٠,٢٠٥	٠,١٩٨	٠,١٩٥	٠,١٩٣	٠,١٩٣	٠,١٩٢	٠,١٩٢
٢٨	١٢,٧	٠,٣٢٢	٠,٢٩٦	٠,٢٧٧	٠,٢٦٨	٠,٢٦٥	٠,٢٦٣	٠,٢٦٢	٠,٢٦٢	٠,٢٦٢
٣٠	١٣,٦١	٠,٤١١	٠,٣٨٧	٠,٣٦٧	٠,٣٥٧	٠,٣٥٣	٠,٣٥١	٠,٣٥٠	٠,٣٤٩	٠,٣٤٩
٣٢	١٤,٥١	٠,٥١٥	٠,٤٩٥	٠,٤٦٧	٠,٤٦٦	٠,٤٦٢	٠,٤٦٠	٠,٤٥٩	٠,٤٥٨	٠,٤٥٨

حمل المحور		سمك البلاطة، الانحراف الديناميكي، ملم (بوصة)								
ألف رطل	طن	١٥٠ (٦)	١٨٠ (٧)	٢٠٠ (٨)	٢٣٠ (٩)	٢٥٠ (١٠)	٢٨٠ (١١)	٣٠٠ (١٢)	٣٣٠ (١٣)	٣٥٥ (١٤)
٣٤	١٥,٤٢	٠,٦٣٤	٠,٦٢٢	٠,٦٠٧	٠,٥٩٩	٠,٥٩٥	٠,٥٩٤	٠,٥٩٣	٠,٥٩٢	٠,٥٩٢
٣٦	١٦,٣٣	٠,٧٧٢	٠,٧٦٨	٠,٧٦٢	٠,٧٥٨	٠,٧٥٦	٠,٧٥٦	٠,٧٥٥	٠,٧٥٥	٠,٧٥٥
٣٨	١٧,٢٤	٠,٩٣٠	٠,٩٣٤	٠,٩٤٢	٠,٩٤٧	٠,٩٤٩	٠,٩٥٠	٠,٩٥١	٠,٩٥١	٠,٩٥١
٤٠	١٨,١٤	١,١١	١,١٢	١,١٥	١,١٧	١,١٨	١,١٨	١,١٨	١,١٨	١,١٨
٤٢	١٩,٠٥	١,٣٢	١,٣٣	١,٣٨	١,٤٢	١,٤٤	١,٤٥	١,٤٦	١,٤٦	١,٤٦
٤٤	١٩,٩٦	١,٥٦	١,٥٦	١,٦٤	١,٧١	١,٧٥	١,٧٧	١,٧٨	١,٧٨	١,٧٨
٤٦	٢٠,٨٦	١,٨٤	١,٨٣	١,٩٤	٢,٠٤	٢,١٤٠	٢,١٤	٢,١٥	٢,١٦	٢,١٦
٤٨	٢١,٧٧	٢,١٦	٢,١٢	٢,٢٦	٢,٤١	٢,٥١	٢,٥٦	٢,٥٨	٢,٥٩	٢,٦٠
٥٠	٢٢,٦٨	٢,٥٣	٢,٤٥	٢,٦١	٢,٨٢	٢,٩٦	٣,٠٣	٣,٠٧	٣,٠٩	٣,١٠
٥٢	٢٣,٥٩	٢,٩٥	٢,٨٢	٣,٠١	٣,٢٧	٣,٤٧	٣,٥٨	٣,٦٣	٣,٦٦	٣,٦٨
٥٤	٢٤,٤٩	٣,٤٣	٣,٢٣	٣,٤٣	٣,٧٧	٤,٠٣	٤,١٨	٤,٢٧	٤,٣١	٤,٣٣
٥٦	٢٥,٤٠	٣,٩٨	٣,٧٠	٣,٩٠	٤,٣١	٤,٦٥	٤,٨٦	٤,٩٨	٥,٠٤	٥,٠٧
٥٨	٢٦,٣١	٤,٥٩	٤,٢٢	٤,٤٢	٤,٩٠	٥,٣٤	٥,٦٢	٥,٧٨	٥,٨٦	٥,٩٠
٦٠	٢٧,٢٢	٥,٢٨	٤,٨٠	٤,٩٩	٥,٥٤	٦,٠٨	٦,٤٥	٦,٦٦	٦,٧٨	٦,٨٤
٦٢	٢٨,١٢	٦,٠٦	٥,٤٥	٥,٦١	٦,٢٣	٦,٨٩	٧,٣٦	٧,٦٤	٧,٨٠	٧,٨٨
٦٤	٢٩,٠٣	٦,٩٢	٦,١٨	٦,٢٩	٦,٩٨	٧,٧٦	٨,٣٦	٨,٧٢	٨,٩٣	٩,٠٤
٦٦	٢٩,٩٤	٧,٨٩	٦,٩٨	٧,٠٥	٧,٧٨	٨,٧٠	٩,٤٤	٩,٩١	١٠,١٨	١٠,٣٣
٦٨	٣٠,٨٤	٨,٩٦	٧,٨٨	٧,٨٧	٨,٦٦	٩,٧١	١٠,٦١	١١,٢٠	١١,٥٥	١١,٧٥
٧٠	٣١,٧٥	١٠,٢	٨,٩	٨,٨	٩,٦	١٠,٨	١١,٩	١٢,٦	١٣,١	١٣,٣
٧٢	٣٢,٦٦	١١,٥	١٠,٠	٩,٨	١٠,٦	١٢,٠	١٣,٢	١٤,١	١٤,٧	١٥,٠
٧٤	٣٣,٥٧	١٢,٩	١١,٢	١٠,٩	١١,٧	١٣,٢	١٤,٧	١٥,٨	١٦,٥	١٦,٩
٧٦	٣٤,٤٧	١٤,٥	١٢,٥	١٢,١	١٢,٩	١٤,٥	١٦,٢	١٧,٥	١٨,٤	١٨,٩
٧٨	٣٥,٣٨	١٦,٢	١٣,٩	١٣,٤	١٤,٢	١٥,٩	١٧,٨	١٩,٤	٢٠,٥	٢١,١
٨٠	٣٦,٢٩	١٨,٢	١٥,٥	١٤,٨	١٥,٦	١٧,٤	١٩,٦	٢١,٤	٢٢,٧	٢٣,٥
٨٢	٣٧,١٩	٢٠,٢	١٧,٢	١٦,٤	١٧,٢	١٩,١	٢١,٤	٢٣,٥	٢٥,١	٢٦,١
٨٤	٣٨,١٠	٢٢,٥	١٩,١	١٨,١	١٨,٨	٢٠,٨	٢٣,٤	٢٥,٨	٢٧,٦	٢٨,٨
٨٦	٣٩,٠	٢٥,٠	٢١,٢	١٩,٩	٢٠,٦	٢٢,٦	٢٥,٥	٢٨,٢	٣٠,٤	٣١,٨
٨٨	٣٩,٩٢	٢٧,٦	٢٣,٤	٢١,٩	٢٢,٥	٢٤,٦	٢٧,٧	٣٠,٧	٣٣,٢	٣٥,٠
٩٠	٤٠,٨٢	٣٠,٥	٢٥,٨	٢٤,١	٢٤,٦	٢٦,٨	٣٠,٠	٣٣,٤	٣٦,٣	٣٨,٣

الملحق هـ - مثال على التصميم الإنشائي للرصف الصلب باستخدام طريقة (AASHTO) التجريبية:

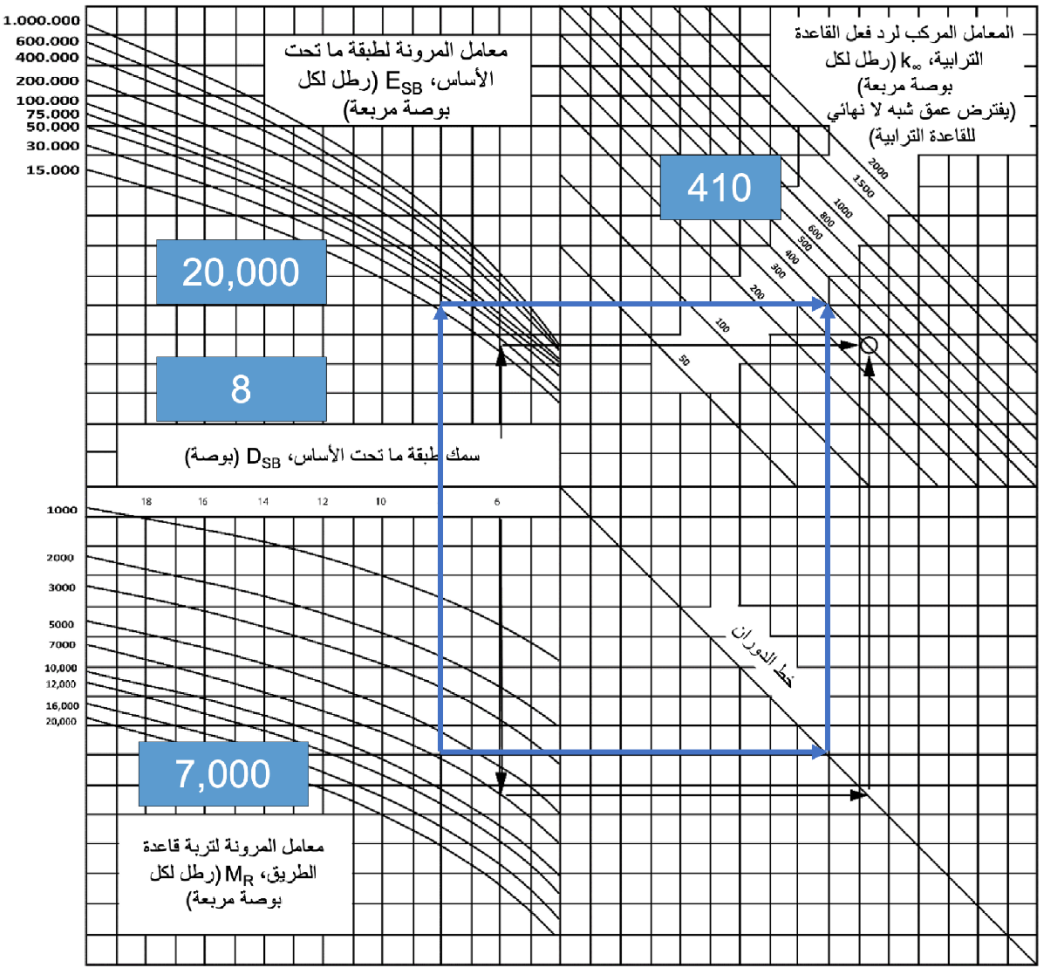
فيما يلي مثال لتطبيق طريقة (AASHTO) للتصميم التجريبي في حال طريق سريع بمؤشر مرور متوقع بقيمة (٢٠×١٠^{٦}) من مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) (قيمة تصميم w_{18}) لمدة تصميمية ٢٠ سنة.

١- عرف (قيمة-k) التصميمية للمعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية وفقًا للجدول (هـ-١). افترض أن معاملات القاعدة الترابية وما تحت الأساس في العمودين (٢) و (٣)، وطبقة ما تحت أساس حبيبية بسمك ٨ بوصة (٢٠ سم) وسمك بلاطة متوقع قدره ١٢ بوصة (٣٠ سم). يُملأ العمود (٤) وفقًا للشكل (٦-٢). يُعطي الشكل (هـ-١) مثالًا لتقدير المعامل المركب لرد فعل القاعدة الترابية (k_{∞} = 410 رطل لكل بوصة مكعبة) عند معامل مرونة طبقة للقاعدة الترابية (M_R) قدره ٤٨ ميجا باسكال (٧,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة) ومعامل مرونة طبقة ما تحت الأساس (M_R) قدره ١٣٨ ميجا باسكال (٢٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة). وأيضًا افترض أن عمق الأساسات الصلبة بالقرب من السطح أكبر من ٣ م (١٠ قدم)، لذا لا يُعتد بخطوة تصحيح المعامل المركب لرد فعل القاعدة الترابية بسبب الأساس الصلب وفقًا للقسم الفرعي (٦-٨-٢-١). لذلك، تتطابق قيم العمودين رقم (٤) و(٥). في العمود رقم (٦)، يُقدر التلف النسبي من الشكل (٦-٤).). يُعطي الشكل (هـ-٢) مثالًا لتقدير التلف النسبي حيث (u_r = 1.90). إذاً فإن المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية هو القيمة المقابلة لمتوسط التلف النسبي (وسمك البلاطة المتوقع)، أو بخلاف ذلك فإن (k_{∞} = ٤١٠ رطل لكل بوصة مكعبة وفقًا للجدول (هـ٢. أخيرًا، بسبب طبقة ما تحت الأساس الحبيبية غير المترابطة، تُفترض قيمة ٢,٠ لعامل فقدان الدعم (LS) من الجدول (٦-٣). لذا، يُصحح المعامل المركب لرد فعل القاعدة الترابية إلى قيمة فعالة تبلغ ٤٠ رطل لكل بوصة مكعبة من الشكل (هـ-٥).

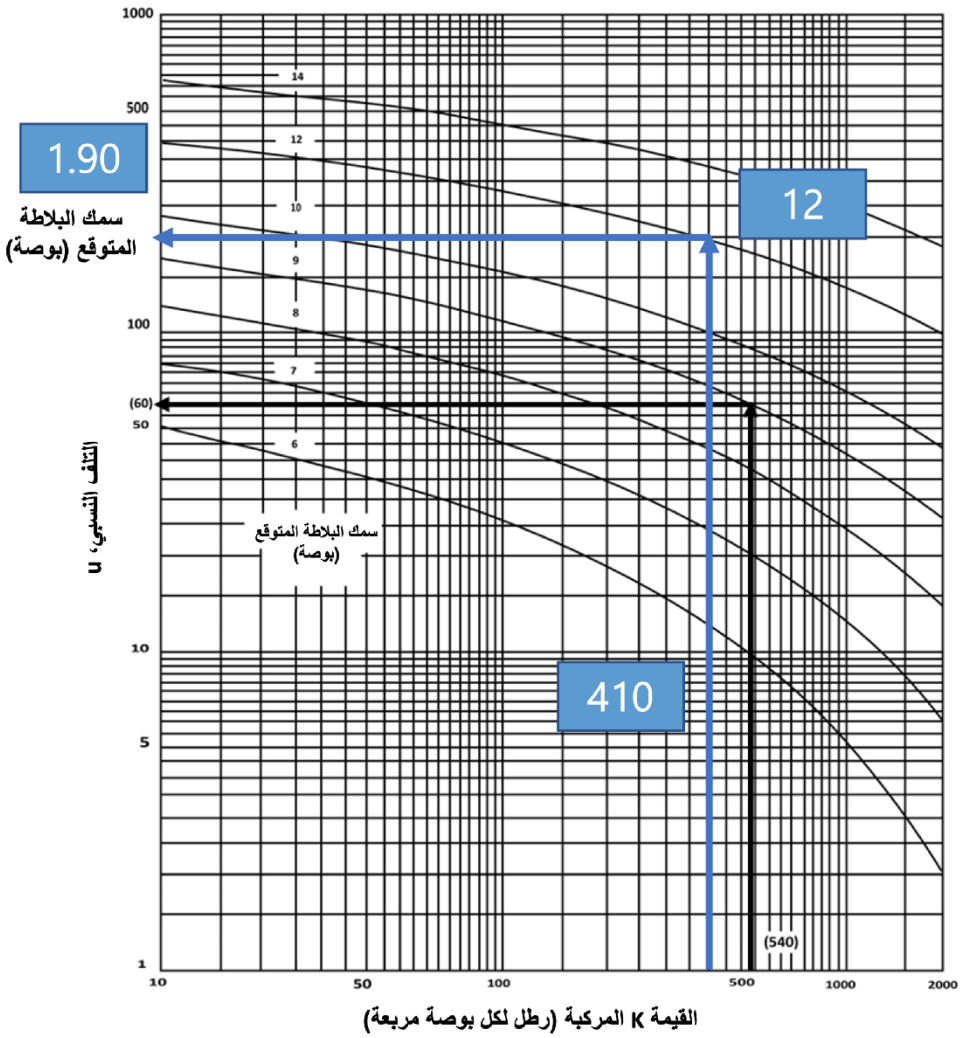
الجدول (ه–١) مثال لتقدير المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية.

طبقة ما تحت الأساس التجريبية:	نوع الحبيبات: السمك (بوصة): ٨ فقدان الدعم (LS)، ٢,٠		عمق الأساسات الصلبة (قدم): ∞ سمك البلاطة المتوقع (بوصة): ١٢		
(١)	(٢)	(٣)	(٤)	(٥)	(٦)
الشهر	معامل القاعدة الترابية (M_R) (رطل لكل بوصة مربعة)	معامل طبقة ما تحت الأساس (E_{SB}) (رطل لكل بوصة مربعة)	(قيمة-k) للمعامل المركب (رطل لكل بوصة مكعبة) (الشكل ٦-٣)	(قيمة-k) للأساسات الصلبة (رطل لكل بوصة مكعبة) (الشكل ٦-٤)	التلف النسبي، u_r، (الشكل ٦-٥)
يناير	١٠,٠٠٠	٣٠,٠٠٠	٦٠٠	٦٠٠	١,٧٥
فبراير	١٠,٠٠٠	٣٠,٠٠٠	٦٠٠	٦٠٠	١,٧٥
مارس	٥,٠٠٠	٢٠,٠٠٠	٣٤٠	٣٤٠	٢,١٠
أبريل	٥,٠٠٠	٢٠,٠٠٠	٣٤٠	٣٤٠	٢,١٠
مايو	٧,٠٠٠	٢٠,٠٠٠	٤١٠	٤١٠	١,٩٠
يونيو	٧,٠٠٠	٢٠,٠٠٠	٤١٠	٤١٠	١,٩٠

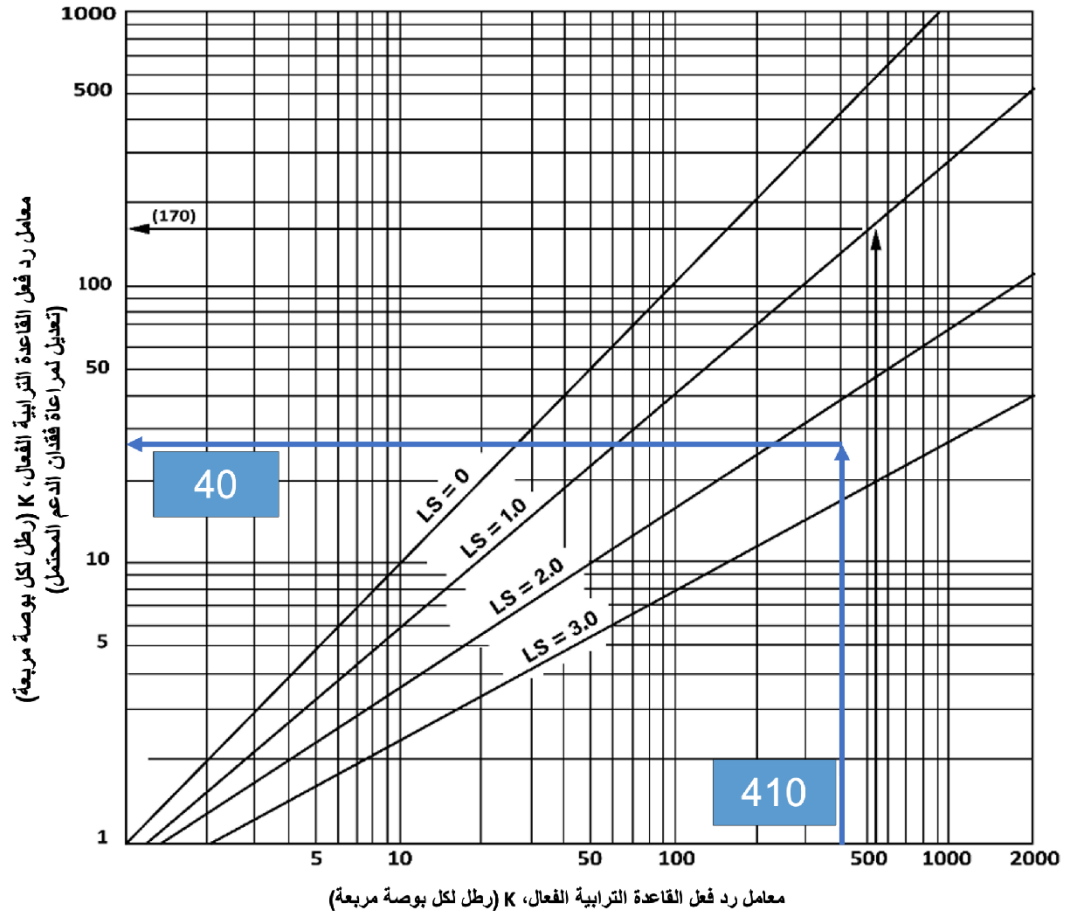
يوليو	٧,٠٠٠	٢٠,٠٠٠	٤١٠	٤١٠	١,٩٠
أغسطس	٧,٠٠٠	٢٠,٠٠٠	٤١٠	٤١٠	١,٩٠
سبتمبر	٧,٠٠٠	٢٠,٠٠٠	٤١٠	٤١٠	١,٩٠
أكتوبر	٧,٠٠٠	٢٠,٠٠٠	٤١٠	٤١٠	١,٩٠
نوفمبر	٥,٠٠٠	٢٠,٠٠٠	٣٤٠	٣٤٠	٢,١٠
ديسمبر	١٠,٠٠٠	٣٠,٠٠٠	٦١٠	٦١٠	١,٧٥
المتوسط: $(\overline{u_r} = \frac{\Sigma u_r}{n} = 1.91)$				المجموع:Σu_r	٢٢,٩٥
المعامل الفعال لرد فعل القاعدة الترابية، k (رطل لكل بوصة مكعبة) = ٤١٠					
فقدان الدعم المصحح: k (رطل لكل بوصة مكعبة) = ٤٠					



الشكل (ه–١) مثال لتقدير المعامل المركب لرد فعل القاعدة الترابية.



الشكل (ه–٢) مثال لتقدير التلف النسبي للرصفيات الصلبة بناءً على سمك البلاطة والدعم أسفلها.



الشكل (هـ–٣) مثال لتصحيح معامل تفاعل القاعدة الترابية لفقدان دعم طبقة ما تحت الأساس المحتمل.

٢- احسب عدد مرات تطبيق مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) للمسار التصميمي. علمًا أن قيمة w_{18} مُعطاة وتساوي (٥×١٠^{٦}). ملحوظة: مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد هي دالة في عمق البلاطة (D). ولذلك، يُفترض العمق الأولي للبلاطة لحساب مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) وتكرار العملية إلى أن تتطابق السماكة المفترضة للبلاطة مع السماكة المحسوبة.

٣- اختر مستوى الثقة في الأداء R (٪) من الجدول (٥-٧). لنفترض أن قيمته هي ٩٥ ٪ .

٤- اختيار الانحراف المعياري الكلي (S_o). وفقًا للجزء الفرعي (٥-٢-٥)، تُختار قيمة بمقدار ٠,٣٥.

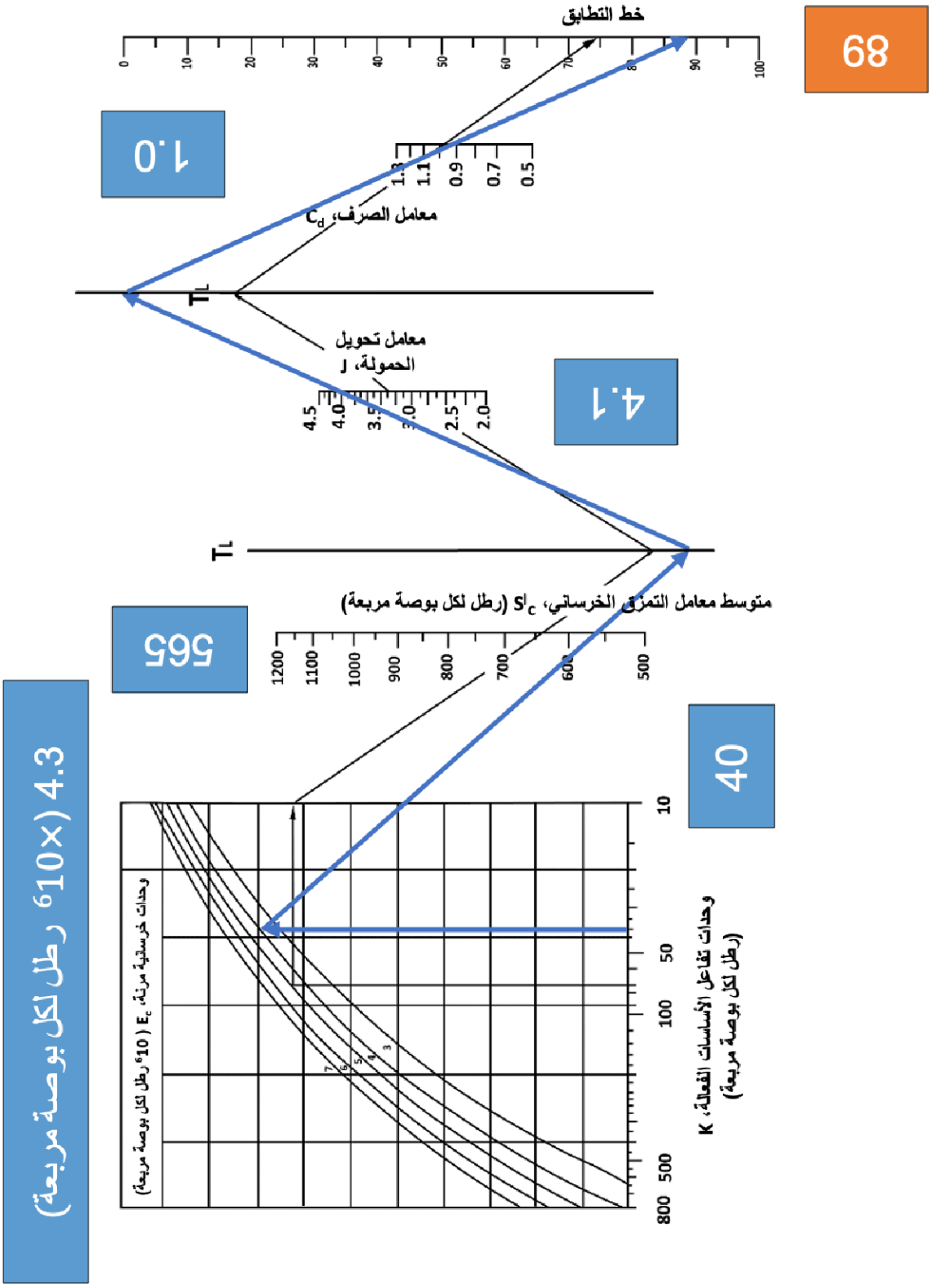
٥- عرف ΔPSI وفق المعادلة (٥-١). مؤشر مستوى الخدمة الأولي للرصفيات الصلبة يساوي ٤,٥ وفقًا للجزء (٦-٢). إذا أُفترض أن قيمة مؤشر مستوى الخدمة النهائي تساوي ٢,٥، فإن ΔPSI ستساوي ٢,٠.

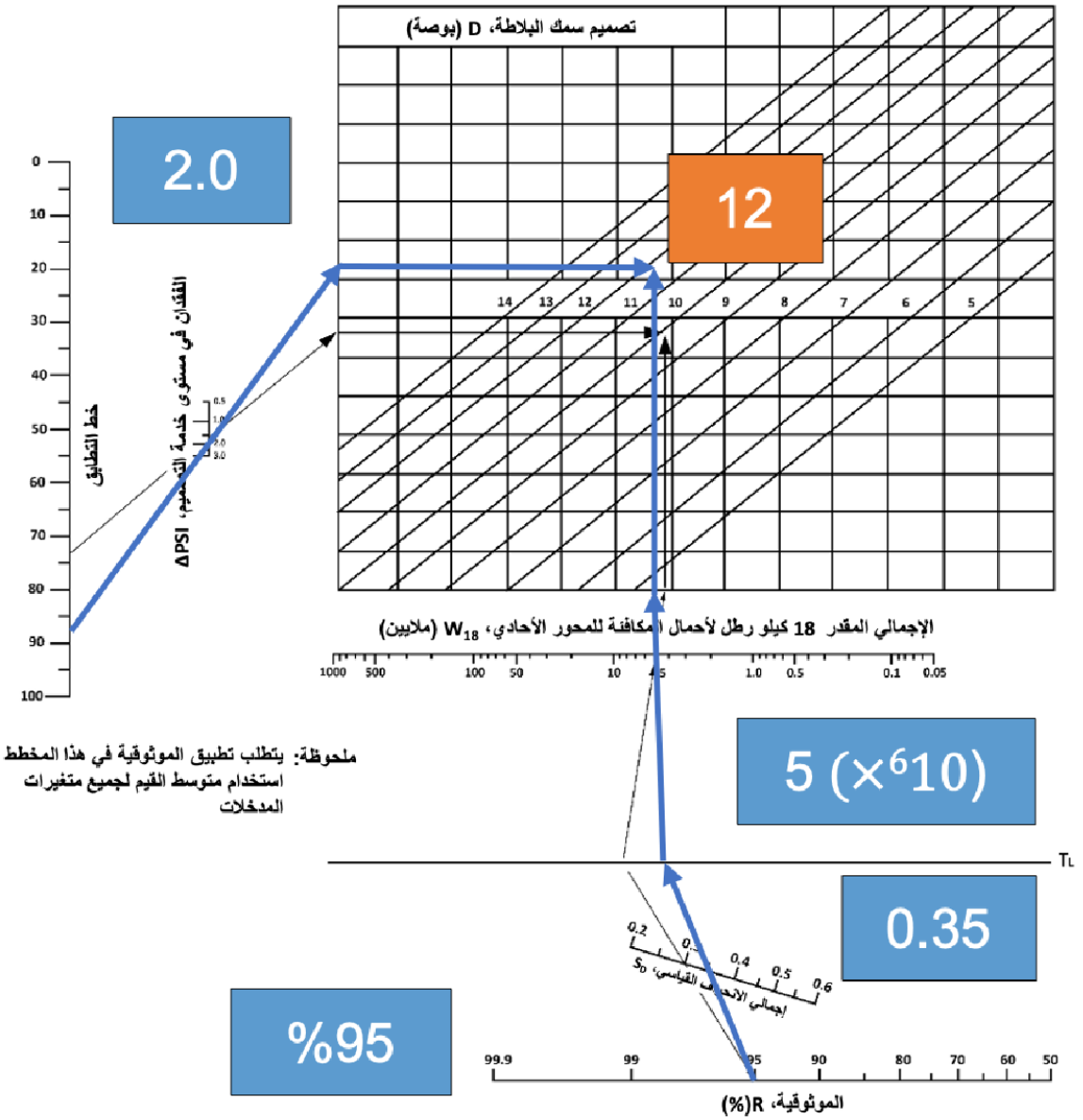
٦- افرض أن معامل مرونة الخرسانة ومعامل التمزق هما ٣٠,٠٠٠ ميجا باسكال (٤,٣٤٣ ×١٠^{٦}رطل لكل بوصة مربعة) و٣,٩ ميجا باسكال (٥٦٥ رطل لكل بوصة مربعة) على التوالي.

٧- حدد معامل نقل الأحمال (J). وافترض وجود كتف أسفلت بدون أجهزة نقل الحمل واختر قيمة (J=4.1) وفقًا للجدول (٦-٢).

٨- حدد عوامل معامل الصرف من الجدول (٦-١). افتراض أن جودة الصرف معقولة) وأن النسبة الزمنية التي يتعرض فيها الهيكل الإنشائي للرصف لمستويات الرطوبة التي قد تصل للتشبع هي ٥٪. ومن ثم، يعادل معامل الصرف (C_d) ١,٠٠.

٩- حدد سمك بلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي من الشكل (هـ-٤).


68
خط التطابق
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
1.0
1.3
1.1
0.9
0.7
0.5
معامل الصرف، C_d
T_L
معامل تحويل
الحمولة، J
4.1
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
T_L
متوسط معامل التمزق الخرساني، S'_c (رطل لكل بوصة مربعة)
565
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
40
وحدات خرسانية مرنة، E_c (10^6 رطل لكل بوصة مربعة)
7
6
5
4
3
وحدات تفاعل الأساسات الفعالة، K
(رطل لكل بوصة مربعة)
10
50
100
500
800
4.3 (10^6 رطل لكل بوصة مربعة)



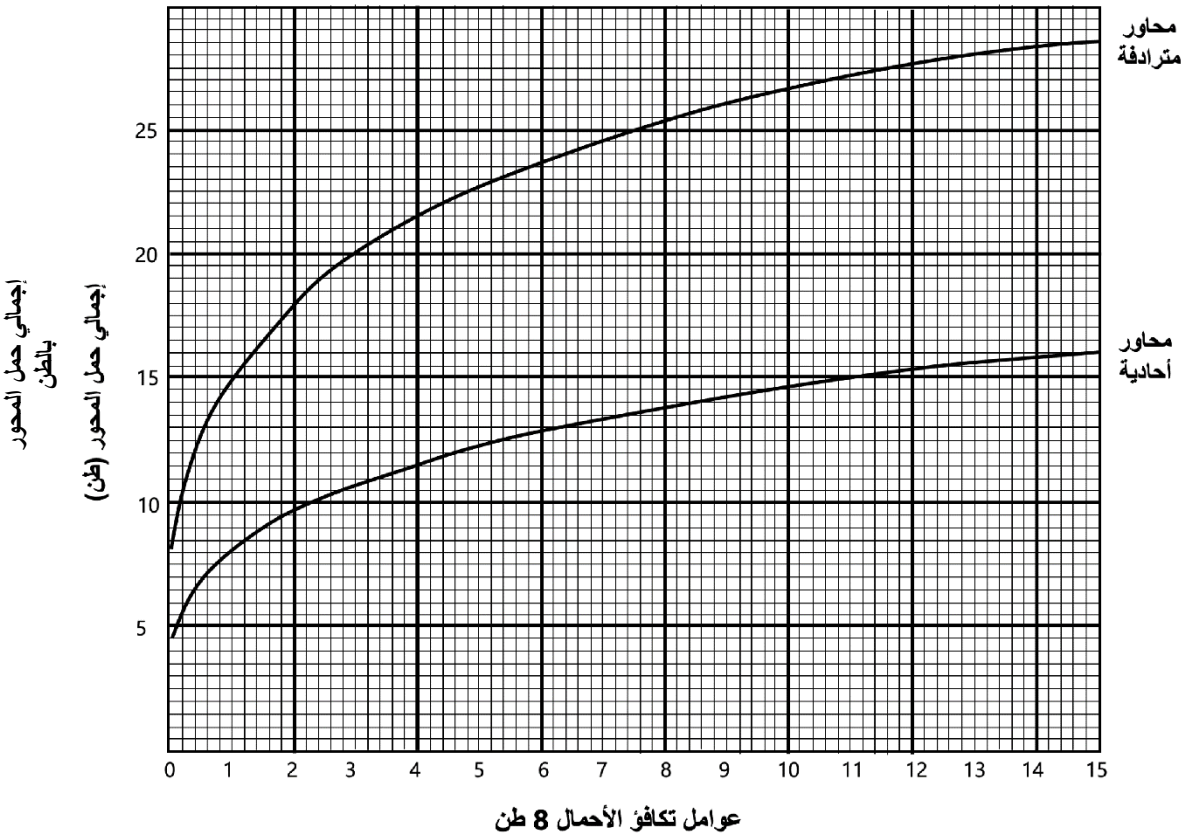
الشكل (هـ–٤) مثال للرسم البياني التصميمي للرصفيات الصلبة.

١٠- تحديد القطاع العرضي النهائي للرصف:

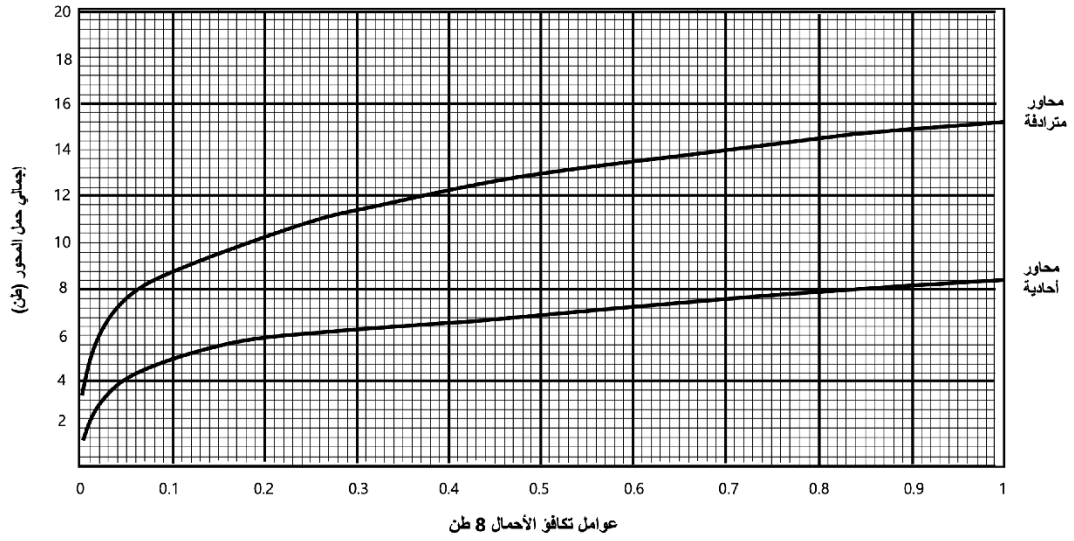
الطبقة السطحية (خرسانة من الأسمنت البورتلاندي) D_{PCC} = ٣٠٠ ملم (١٢ بوصة)، E_{PCC} = ٣٠,٠٠٠ ميجا باسكال (٤.٣ ×١٠^{٦} رطل لكل بوصة مربعة)
طبقة ما تحت الأساس (ركام غير مترابط) D_{SB} = ٢٠٠ ملم (٨ بوصة)، E_{SB} = ١٣٨ ميجا باسكال (٢٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)
طبقة القاعدة الترابية E_{SG} = ٤٨ ميجا باسكال (٧,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)

الشكل (ه–٥) مثال للقطاع العرضي النهائي للرصف الصلب.

الملحق و - عوامل تكافؤ الأحمال لتصميم رصف مرن بقطاع عرضي ثابت



الشكل (و–١) عوامل تكافؤ الأحمال لإجمالي الأحمال المحورية من ١ إلى ١٥ طنًا.



الشكل (و–٢) عوامل تكافؤ الأحمال لإجمالي الأحمال المحورية الأقل من ١ طن.

الملحق ز - مثال على تصميم الطرق غير المُعبّدة:

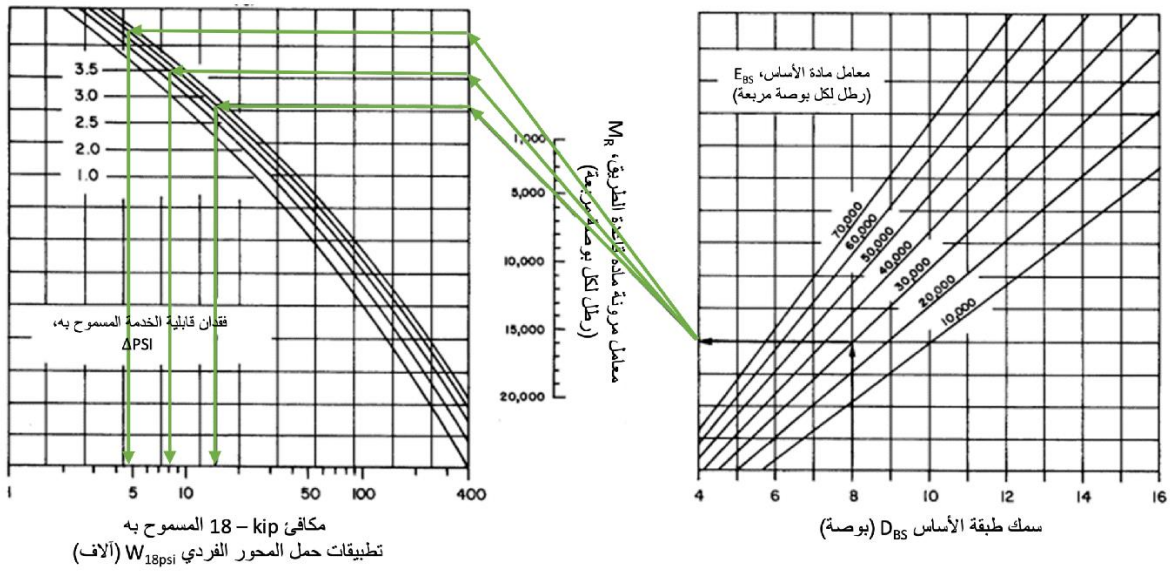
فيما يلي مثال على تنفيذ طريقة (AASHTO) للتصميم التجريبي للطرق ذات الأسطح الركامية، وذلك وفقًا للخطوات الموضحة في الجزء الفرعي (٨-١-٤). وسوف يُعرض جدول واحد كمثال مطابق للجدول (٨-١).

١- اعتبر أن سماكة الأساس الركامي ٢٠٣ مم (٨ بوصة).
٢- واعتبر أن فاقد قابلية الخدمة التصميمي يساوي ٣ والتخدد المسموح به يساوي ٢,٥.
٣- تُدخَل معاملات المرونة الموسمية المناسبة لمواد كل من القاعدة الترابية وطبقة الأساس الحبيبي. حيث يفترض أن معامل المرونة لطبقة الأساس الركامية يساوي قيمة ثابتة قدرها ٢٠٧ ميجا باسكال (٣٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة). وتظهر هذه القيم في العمودين ٢ و ٣ من الجدول (ز-١).
٤- وقد استخدم إجمالي مرور قدره ٢١,٠٠٠ لعدد مرات تطبيق مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL)، موزعةً على مدار العام (العمود ٤ من الجدول ز-١).
٥- قُدر مرور مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) المسموح بها عن كل موسم باستخدام الرسم البياني التصميمي (nomograph) المستند إلى قابلية الخدمة في الشكل (٨-١). لهذا المثال؛ فإن مرور مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) المسموح به للفصول الثلاثة مُعطى في الشكل (ز-١). وأدخلت القيم في العمود ٥ من الجدول (ز-١).
٦- قُدر مرور مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) المسموح بها عن كل موسم باستخدام الرسم البياني التصميمي (nomograph) المبني على التخدد في الشكل (٨-٢). لهذا المثال؛ فإن مرور مكافئات الحمل المروري المحوري المفرد (ESAL) المسموح به للفصول الثلاثة مُعطى في الشكل (ز-٢). وأدخلت القيم في العمود ٦ من الجدول (ز-٢).
٧- قسّم المرور الموسمي المتوقع (العمود ٤ من الجدول ز-١) على المرور المسموح به في ذلك الموسم (العمود ٥ من الجدول ز-١). أدخل قيم هذه التلفيات الموسمية في العمود ٦ المقابلة لمعايير قابلية الخدمة. وبعدئذٍ، اتبع نفس التعليمات بالنسبة لمعايير التخدد، أي بقسمة العمود ٤ على العمود ٧ وإدخال الناتج في العمود ٨.
٨- احسب التلفيات الإجمالية لكلا معياري قابلية الخدمة والتخدد عن طريق إضافة التلفيات الموسمية. أُعِد رسم بياني يوضح التلفيات الكلية مقابل سماكة طبقة الأساس (الشكل ز-٣). كما حُدِّد متوسط سماكة طبقة الأساس المطلوبة ($\overline{D}_{BS}$) عن طريق هذا الرسم البياني لإجمالي تلفيات يساوي القيمة ١. وفي هذا المثال، يُتحكَّم في التصميم من خلال معايير قابلية الخدمة. ولذلك، فإن سماكة طبقة الأساس المطلوبة ($\overline{D}_{BS}$) تساوي ٢٧٢ ملم (١٠,٧ بوصة).
٩- إذا كان إجمالي الفاقد الركامي ٥٠ مم (٢ بوصة) وكان متوسط السماكة المطلوبة لطبقة الأساس ٢٧٢ مم (١٠,٧ بوصة)، فإن السمك التصميمي سيكون، وفقًا للمعادلة (٨-٤) ($D_{BS} = 272 + (0.5 \times 50)$) ٢٩٧ ملم (١١,٧ بوصة).
١٠- تتمثل الخطوة الأخيرة في تحويل جزء من سماكة طبقة الأساس الركامية إلى سماكة مكافئة لمادة طبقة ما تحت الأساس (الشكل ز-٤). تصبح السماكة النهائية المطلوبة لطبقة الأساس (D_{BS-f}) هي ١٥٢ مم (٦ بوصة). ارسم خطًّا للمعامل المقدر لمادة طبقة ما تحت الأساس، E_{SB}، والذي يفترض أنه ١٠٣ ميجا باسكال (١٥,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة). استمر عبر المقياس المقابل للخفض في سماكة طبقة الأساس (D_{BS}- D_{BS-f})، أي (٢٩٧ - ١٥٢ = ١٤٥ مم أو ٥,٧ بوصة)، ثم حدد السماكة المطلوبة لطبقة ما تحت الأساس، (٢٢٩ مم أو ٩ بوصة) بالنسبة للمعامل المعلوم لمادة طبقة الأساس (٢٠٧ ميجا باسكال أو ٣٠,٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة).

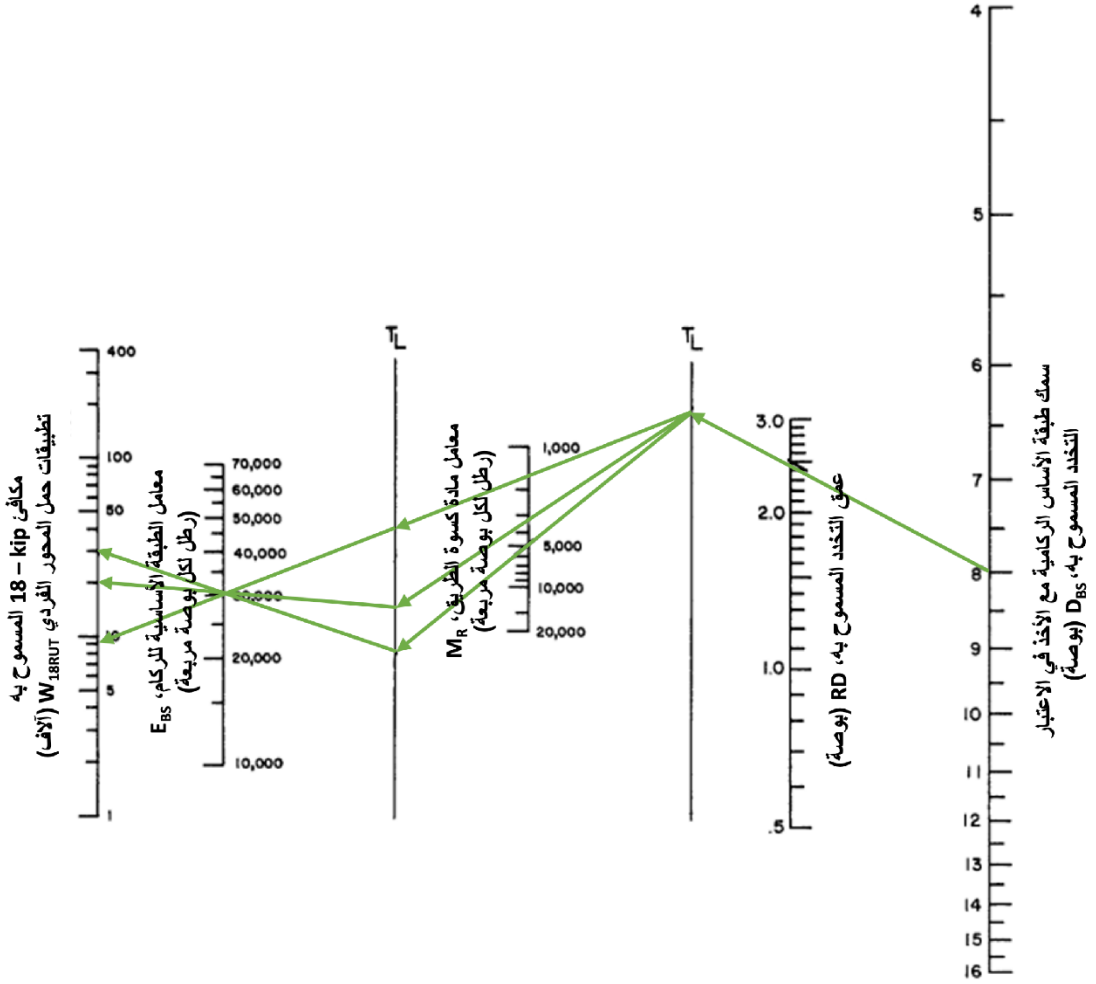
الجدول (ز–١) مثال لحساب تلفيات الرصف الإجمالية استنادًا إلى سماكة طبقة الأساس الركامية التجريبية.

سماكة طبقة الأساس التجريبية، D_{BS} = 203 مم (٨ بوصة)			معايير قابلية الخدمة ΔPSI = 3		معايير التخدد RD (بوصة) = ٢,٥	
(١)	(٢)	(٣)	(٤)	(٥)	(٦)	(٧)	(٨)
حالة رطوبة القاعدة الترابية (مواسم)	معامل مرونة القاعدة الترابية، M_R	معامل مرونة طبقة الأساس، E_{BS}	المرور المتوقع لمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد	المرور المسموح به لمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد	التلفيات الموسمية w_{18} / $(W_{18})_{PSI}$	المرور المسموح به لمكافئات الحمل المروري المحوري المفرد	التلفيات الموسمية w_{18} / $(W_{18})_{RUT}$

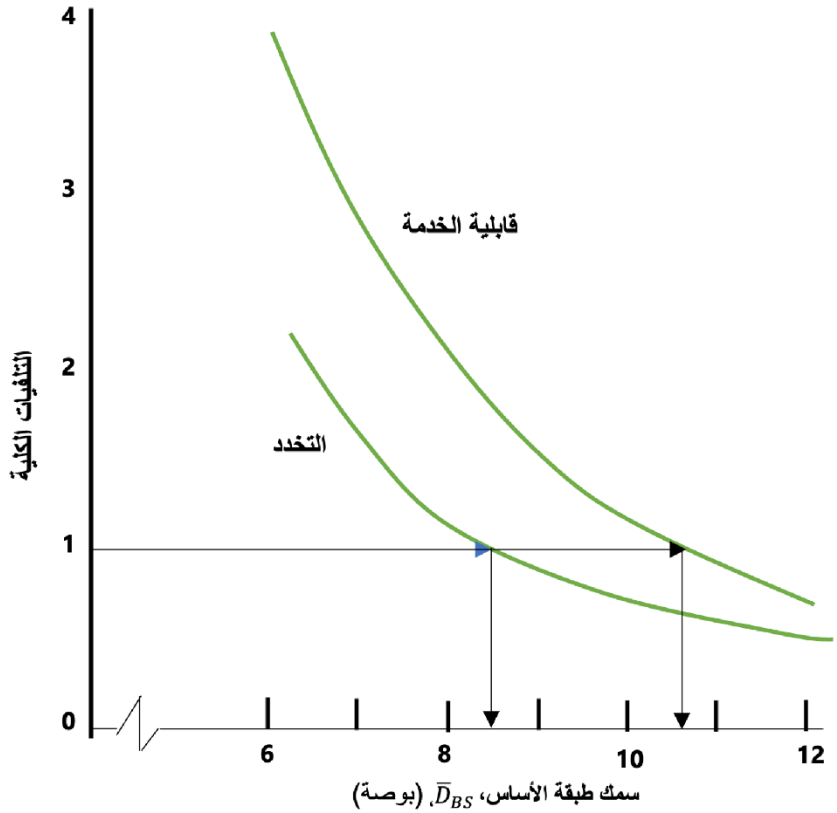
			(ESAL)، w_{18}		(ESAL)، $(W_{18})_{PSI}$		(ESAL)، $(W_{18})_{RUT}$	
مشبع	١٠ ميجا باسكال (١,٥٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٢٠٧ ميجا باسكال	٣,٠٠٠		٤,٩٠٠	٠,٦١	٨,٤٠٠	٠,٣٦
رطب	٢٣ ميجا باسكال (٣,٣٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٢٠٧ ميجا باسكال	٧,٠٠٠		٨,٤٠٠	٠,٨٣	٢٠,٠٠٠	٠,٣٥
جاف	٣٤ ميجا باسكال (٤,٩٠٠ رطل لكل بوصة مربعة)	٢٠٧ ميجا باسكال	١١,٠٠٠		١٦,٠٠٠	٠,٦٩	٢٩,٠٠٠	٠,٣٨
	الحركة المرورية الإجمالية = ٢١,٠٠٠				التلفيات الإجمالية = ٢,١٣		التلفيات الإجمالية = ١,٠٩	



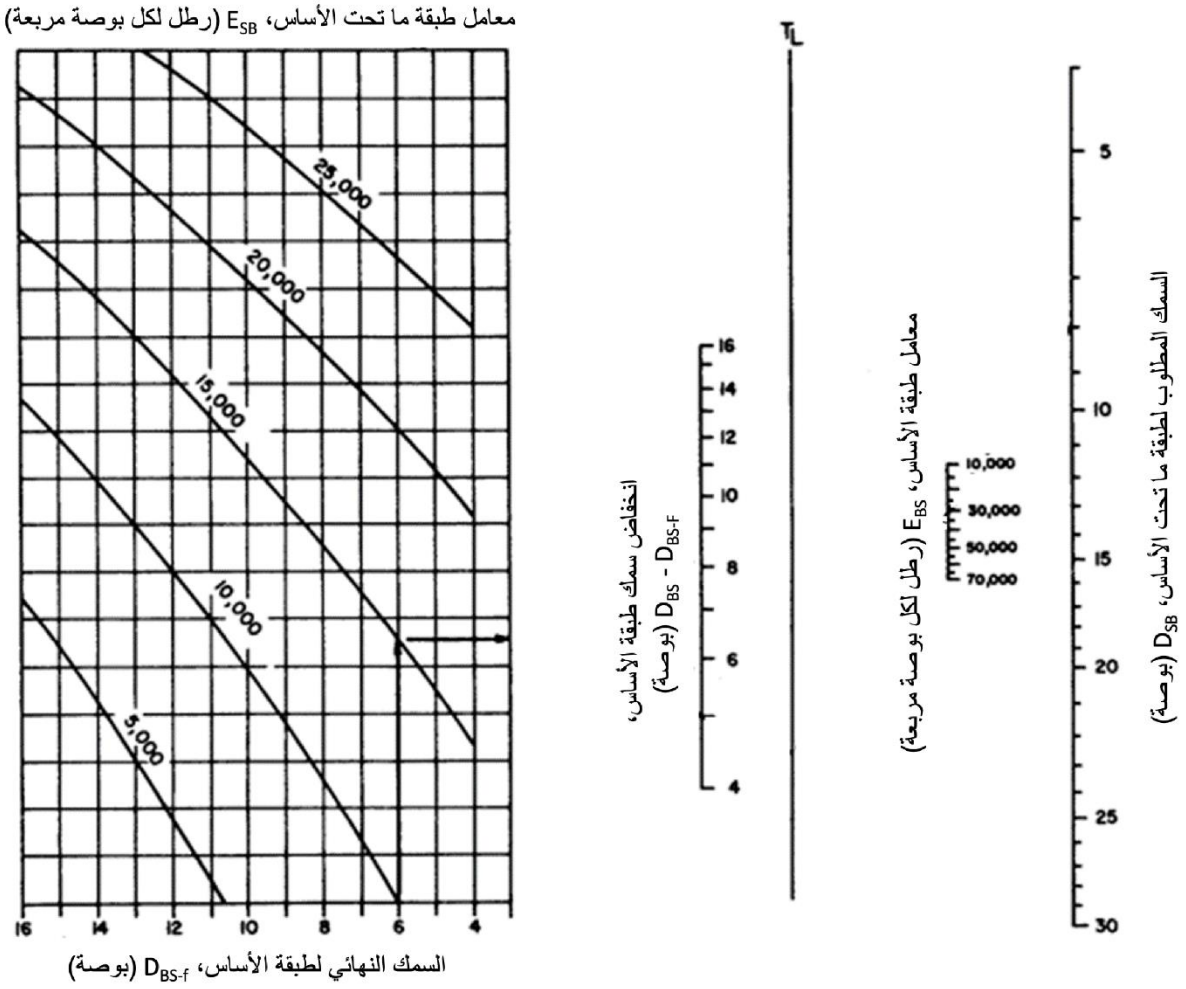
الشكل (ز–١) مثال للرسم البياني التصميمي للطرق ذات الأسطح الركامية مع الأخذ في الاعتبار الفاقد في قابلية الخدمة المسموح به.



الشكل (ز–٢) مثال للرسم البياني التصميمي للطرق ذات الأسطح الركامية مع الأخذ في الاعتبار التخدد المسموح به.



الشكل (ز–٣) مثال على تزايد التلفيات الكلية مقابل سماكة طبقة الأساس لكلا معياري قابلية الخدمة والتخدد.



الشكل (ز–٤) مثال على تحويل جزء من سماكة طبقة الأساس الركامية إلى سماكة مكافئة لطبقة ما تحت الأساس.

الملحق ح – المواصفات المرجعية:

الجدول (ح–١) عناوين وتسميات مواصفات (AASHTO) و (ASTM) و (MRDTM) و (ACI) و (SASO) المنطبقة على المجلد.

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
M6					Standard Specification for Fine Aggregate for Hydraulic Cement Concrete
M17	D242				Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design
M29	D1073				Standard Specification for Fine Aggregate for Asphalt Mixtures
M31	A615		ASTM A615		Standard Specification for Deformed and Plain Carbon and Low-Alloy Steel Bars for Concrete Reinforcement
M43	D448		D448		Standard Specification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction
M80	C33				Standard Specification for Coarse Aggregate for Hydraulic Cement Concrete
M85	C150		ASTM C150M		Standard Specification for Portland Cement
M92	E11				Standard Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes
M144	D98				Standard Specification for Calcium Chloride
M145	D3282	210			Standard Specification for Classification of Soils and Soil–Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes
M240	C595		ASTM C595		Standard Specification for Blended Hydraulic Cement

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
M288					Standard Specification for Geosynthetic Specification for Highway Applications
M302	C989				Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars
M307	C1240		ASTM C1240		Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures
M320					Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder
M323					Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design
M332					Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test
R30					Standard Practice for Laboratory Conditioning of Asphalt Mixtures
R35					Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures
R60	C172	516			Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete
R90					Standard Practice for Sampling Aggregate Products
T19	C29				Standard method of test for bulk density ("unit weight") and voids in aggregate
T21					Standard Method of Test for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete
T22	C39		1253		Standard Method of Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
T27	C136	204			Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
T44					Standard Method of Test for Solubility of Bituminous Materials
T48	D92				Standard Method of Test for Flash Point of Asphalt Binder by Cleveland Open Cup
T49	D5				Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials
T51	D113		D113		Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials
T84	C128				Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate
T85	C127				Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate
T88		205			Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils
T89		208			Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils
T90	D4318	209			Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils
T97	C78				Standard Method of Test for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
T99	D698	212			Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soils Using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.) Drop
T100	D854				Standard Method of Test for Specific Gravity of Soils

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
T102					Standard Method of Test for Spot Test of Asphaltic Materials
T104	C88				Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate
T112	C142		C142		Standard Method of Test for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregate
T113	C123				Standard Method of Test for Lightweight Particles in Aggregate
T119	C143	517			Standard Method of Test for Slump of Hydraulic Cement Concrete
T140					Standard Method of Test for Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure
T164	D2172				Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures
T166	D2726				Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Asphalt Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens
T170					Standard Method of Test for Recovery of Asphalt Binder from Solution by Abson Method
T176	D2419				Standard Method of Test for Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test
T180	D1557	212			Standard Method of test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
T190	D2844				Standard Method of Test for Resistance R-Value and Expansion Pressure of Compacted Soils
T193	D1883	213			Standard Method of Test for the California Bearing Ratio
T198	C496				Standard Method of Test for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
T27	C136	204			Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
T201	D2170		D2170		Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts
T202	D2171		D2171		Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer
T209	D2041				Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures
T215					Standard Method of Test for Permeability of Granular Soils (Constant Head)
T222	D1196				Standard Method of Test for Nonrepetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements
T240	D2872		D2872		Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)
T245	D5581				Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
T255	C566				Standard Method of Test for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying
T256	D4695				Standard Method of Test for Pavement Deflection Measurements
T258					Standard Method of Test for Determining Expansive Soils
T269	D3203				Standard Method of Test for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Asphalt Mixtures
T279	D3319				Standard Practice for the Accelerated Polishing of Aggregates Using the British Wheel
T283					Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage
T298	E303				Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester
T304	C1252				Standard Method of Test for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate
T307					Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials
T308	D6307				Standard Method of Test for Determining the Asphalt Binder Content of Asphalt Mixtures by the Ignition Method
T312	D6925				Preparing and Determining the Density of HMA Specimens by means of the Superpave Gyratory Compactor

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
T313					Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)
T314					Standard Method of Test for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)
T315					Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)
T316					Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer
T319					Standard Method of Test for Quantitative Extraction and Recovery of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures
T321					Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending
T322	D6931				Standard Method of Test for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device
T324					Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures
T335	D5821				Standard Method of Test for Determining the Percentage of Fracture in Coarse Aggregate

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
T342					Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)
T350					Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)
T380					Standard Method of Test for Potential Alkali Reactivity of Aggregates and Effectiveness of ASR Mitigation Measures (Miniature Concrete Prism Test, MCPT)
T387					Standard Method of Test for Determining the Cracking Temperature of Asphalt Binder Using the Asphalt Binder Cracking Device (ABCD)
TP142					Standard Specification for Accelerated Determination of Potentially Deleterious Expansion of Concrete Cylinder Due to Alkali–Silica Reaction (Accelerated Concrete Cylinder Test, ACCT)
	C51				Standard Terminology Relating to Lime and Limestone (as Used by the Industry)
	C131				Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
	C260				Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete
	C295				Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
	C469				Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression
	C494				Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete
	C535				Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
	C936				Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units
	C1152				Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete
	C1157				Standard Performance Specification for Hydraulic Cement
	C1176				Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table
	C1435				Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer
	C1580	318			Standard Test Method for Water-Soluble Sulfate in Soil
	D512	514			Standard Test Methods for Chloride Ion in Water
	D516	514			Standard Test Method for Sulfate Ion in Water
	D698				Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft^3 (600 kN-m/m^3)

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
	D946				Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement Construction
	D1188				Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures Using Paraffin-Coated Specimens
	D1196				Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements
	D1633				Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders
	D2493				Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalt Binders
	D2766				Standard Test Method for Specific Heat of Liquids and Solids
	D3381				Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement Construction
	D4215				Standard Specification for Cold-Mixed, Cold-Laid Asphalt Paving Mixtures
	D4694				Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device
	D4791				Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate
	D4792				Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
	D4867				Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures
	D5858				Standard Guide for Calculating in Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory
	D6926				Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus
	D6927				Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures
	D6931				Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures
	D7369				Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Asphalt Mixtures by Indirect Tension Test
	E1952				Standard Test Method for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity by Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry
	D1411	319			Chloride Determination in Aggregates
			469		Motor Vehicles - Dimensions and Weights
		504	142		Physical Testing of Portland Cement
			3026		Specification for Polymers in Soils for Erosion Purposes
			ASTM D7957		Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement

AASHTO	ASTM	MRDTM	SASO	ACI	العنوان
				211.1	Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete
				318M	Building Code Requirements for Structural Concrete
				330R-08	Guide for the Design and Construction of Concrete Parking Lots
				440.11	Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars
				440.1R	Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars

الملحق ط - مسرد المصطلحات:

إجهاد الانضغاط - الإجهاد الذي يتسبب في تشوه مادة أو منشأة عن طريق دفع جزيئاتها معًا وتشكيل حجم أصغر.

الأحمال المحورية - معلمة تصميم في هندسة الطرق والسكك الحديدية تُعرَّف بأنها مجموع القوى الرأسية الثابتة لسطح الطريق في منطقة التلامس مع عجلات أي محور.

اختبار مقاومة الانضغاط - هو اختبار ميكانيكي يُجرَى على عينة مادة (مكعب أو منشور أو أسطوانة) مثل: الخرسانة لتحديد أقصى حمل انضغاط يمكن أن يتحمله قبل انكسارها.

الأسفلت – عبارة عن بقايا شبيهة بالأسمنت ذات لون بني غامق إلى أسود يتم الحصول عليها من تقطير الزيوت الخام المناسبة، أو من المصادر الطبيعية أو خليط منهما معًا.

الأسفلت المصطكي (SMA) - خليط أسفلت ساخن ناقص التدرج مُصمم لزيادة مقاومة التشوه (التخدد) والمتانة يمكن استخدامه للرصف ذي الحجم المروري الكبير، أو ذي حركة المرور الكثيفة أو البطيئة أو المتوقفة .

الأسمنت - خليط من الطين والحجر الجيري، يُخلَط عادة مع الماء والرمال والحصى ونحو ذلك، ويُستخدَم في الإنشاء، وهو يشك (يتماسك) ويتصلب ويلتصق بالمواد الأخرى لربطها معًا. ويُستخدم لصنع المونة والخرسانة .

أسمنت بورتلاندي - نوع من الأسمنت الهيدروليكي يتكون من مركبات السيليكا والجير والألومينا التي تتفاعل كيميائيًا مع الماء؛ لإنتاج هيدرات سيليكات الكالسيوم التي تُعدّ بمثابة الصمغ الذي يعطي قوته لخرسانة الأسمنت البورتلاندي .(PCC)

ألواح أسفلتية مستصلحة - مادة تسقيف شائعة يمكن إعادة تدويرها واستخدامها في الرصف الأسفلتي عن طريق إعادة استخدام الألواح في مادة مضافة لخلطة الأسفلت الساخن (HMA) أو الأسفلت البارد لملء الشقوق والحفر. تقدم الألواح الأسفلتية المستصلحة (RAS) فائدة اقتصادية من خلال توفير تكلفة المواد، وتحسين أداء المواد، وتقليل المواد المدفونة بشكل كبير.

انشر-و-اعزل - في حفر النشر والعزل، يُستخدم منشار أو مسحاج تخديد لصقل خندق ضحل فوق الشقوق، ثم يُملأ هذا الخندق بمادة مانعة للتسرب.

انكماش لدن - فقدان المياه عن طريق التبخر من سطح خرساني مخلوط حديثًا، بينما لا يزال في حالة لدنة، أو قبل أن يتماسك، وذلك يمكن أن يحدث في أثناء عملية الترطيب، أو بسبب ظروف بيئية.

أنواع الركام - تتمثل أنواع الركام فيما يلي: ١) الركام الخشن، ٢) الركام الناعم، ٣) مادة الحشو المعدنية.

البرنامج الوطني التعاوني لأبحاث الطرق (NCHRP) - برنامج وطني للأبحاث يُنفذ من خلال الجهود التعاونية لإدارة الطرق الاتحادية (FHWA) والأكاديمية الوطنية للعلوم والهندسة والطب (NASEM) والجمعية الأمريكية لموظفي الطرق والنقل (AASHTO).

بوليمر- أي فئة من المواد الطبيعية أو المواد الصناعية (على سبيل المثال: اللدائن الحرارية) تتكون من جزيئات كبيرة جدًا، تُسمى جزيئات ضخمة، وإنها مضاعفات لوحدات كيميائية أبسط تُسمى مونومرات، تُستخدم لتعديل الأسفلت مما يعمل على تعزيز خواصه الميكانيكية.

تثبيت التربة - عملية تحسين أداء التربة باستخدام تقنيات ميكانيكية (على سبيل المثال: الضغط أو التكثيف) أو مواد مضافة (على سيل المثال: الجير والأسمنت البورتلاندي والأسفلت) عن طريق القضاء على التآكل أو تقليله أو تحسين القدرة الداعمة.

تخدد - هبوط طولي متلاصق ينحرف عن سطح مستوي محدد عن طريق ميل عرضي وقطاع طولي.

تدرج الركام - توزيع حبيبات الركام بين الأحجام، التي يحددها التحليل المنخلي، ويعبَّر عنها من حيث النسب المئوية التراكمية الأكبر أو الأصغر من كل من سلسلة من فتحات المنخل.

تصميم الخلطة - عملية تحديد الخليط الأمثل لمواد المكونات، على سبيل المثال: الأسفلت والخرسانة، بما في ذلك تطوير وتقييم واختبار الخلطات التجريبية؛ للتحقق من إمكانية الإيفاء بالخصائص المطلوبة، مثل: مقاومة التخدد وشقوق الكلل للأسفلت والمتانة والفاعلية وقوة الخرسانة.

تصميم الرصفيات - العملية المتبعة لإنشاء هيكل رصف بما في ذلك اختيار مواد الرصف والرصف المناسبة والأنواع وسُمك الطبقة والتكوينات؛ من أجل ضمان أن الرصف جيد لدرجة كافية، ويتطلب الحد الأدنى من الصيانة تحت الأحمال المرورية المتوقعة للعمر المعتمد للتصميم.

تصميم انكماش الرصف الخرساني - نوع من الرصفيات الخرسانية يسمى أيضًا الرصف الخرساني ذو الفواصل (JCP) التي تستخدم وصلات انكماش (عرضية) متباعدة على فترات منتظمة؛ للتحكم في التشقق الناجم عن الانكماش والتمدد في الخرسانة بسبب درجة

الحرارة، ولا يَستخدم أي حديد تسليح. يعتبر دليل (AASHTO) لتصميم الرصف لعام ١٩٩٣م هو طريقة التصميم الوحيدة المعتمدة لمشروعات تصميم انكماش الرصف الخرساني.

تصنيف التربة - تصنيف منهجي للتربة وفقًا لخصائصها المادية) على سبيل المثال: نظام تصنيف ((AASHTO) المستخدمة للتوصل إلى استنتاج بشأن ملاءمتها كتربة قاعدة أرضية.

تصنيف الطرق - تصنيف الطرق وفقًا لنوع الخدمة التي تقدمها وطريقة عملها داخل نظام النقل للمساعدة في إنشاء سمات تصميم الطرق، وسياسة تخطيط استخدام الأراضي، وكثافة المرور، والتنقل والسلامة، ومتطلبات الوصول.

تصنيف المرور - عملية استشعار المركبات المتحركة وعدها وتصنيفها إلى عدة فئات متميزة بناءً على تكوين المركبة أو المحاور.

التكسية الأرضية - إحدى مواد التسليح الصناعي الأرضي القابلة للنفاذ، وتتألف فقط من المنسوجات.

توزيع المرور - توزيع مرور المركبات عبر الطريق.

حجم الحركة المرورية - عدد المركبات التي تعبر الطريق أو جزءًا منه لكل وحدة زمنية في أي فترة محددة، وعادة ما تكون ساعة.

حد أقصى اسمي لحجم الركام (NMAS) - محدد على أنه حجم منخل واحد أكبر من المنخل الأول للاحتفاظ بأكثر من ١٠٪ في سلسلة مناخل قياسية.

الحمل المحوري القياسي المكافئ - قيمة تعبر عن عدد تطبيقات المحور القياسي المكافئ لتأثير تلف الرصف على محور أي كتلة.

خرسانة - مادة مركبة تتكون أساسًا من وسيط رُبط بداخله جسيمات أو شظايا مدمجة من الركام. وفي الخرسانة الهيدروليكية-الأسمنتية تتكون طبقة الربط من خليط من الأسمنت الهيدروليكي والماء.

الخرسانة الأسفلتية - يشار إليها أيضًا باسم الأسفلت أو السطح الأسفلتي، وهي عبارة عن خليط مركب يتكون من الركام ومواد ربط الأسفلت. وهي المواد السطحية الأكثر استخدامًا لإنشاء الطرق، والمطارات، وساحات وقوف السيارات، وأنواع الرصف الأخرى.

خرسانة الأسمنت البورتلاندي - مادة مركبة تتكون من أسمنت بورتلاندي وركام خشن وناعم وماء ومواد كيميائية ومواد مضافة معدنية، ويمكن أن تحتوي أو يمكن ألا تحتوي على هواء داخلي يُستخدم بشكل شائع في إنشاء الرصفيات الخرسانية.

الخرسانة الأسمنتية المدموكة (المرصوصة) - يمكن أن تكون خرسانة مدموكة ذاتيًّا أو خرسانة مرصوصة بمِدحلة. يمكن صب الخرسانة المرصوصة ذاتيًا دون دمك أو اهتزاز، وتوضع الخرسانة المدموكة بمِدحلة -التقليدية أو عالية الكثافة- بمعدات رصف الأسفلت ثم تدمك بالمِدحلة.

خرسانة مدموكه بمدحلة - خرسانة مرصوصة عن طريق الرص بمدحلة؛ وهي خرسانة ستدعم، في حالتها غير المتصلبة، مدحلة في أثناء الدمك .

خرسانة مُسبقة الإجهاد (شد لاحق) - شكل من أشكال الخرسانة المُسلحة التي تُجهد مسبقًا (مدموكة) قبل صبها لزيادة القوة مقابل قوى الشد.

خرسانة مُسلحة - خرسانة إنشائية يُدمج فيها حديد تسليح (قضبان حديدية) لزيادة قوة الشد أو الليونة.

الخشونة - هي إحدى عناصر نسيج السطح، وتُعرف بأنها تعبير عن عدم انتظام سطح الرصف الذي يؤثر سلبًا على ديناميكيات المركبات وجودة الركوب، والأحمال الديناميكية، والصرف، والقطاع الطولي، والقطاع العرضي، والميل العرضي، وتكاليف تأخر المركبات، واستهلاك الوقود، وتكاليف الصيانة ونحو ذلك.

خليط الأسمنت - خليط من الطين والحجر الجيري، يُخلَط عادةً مع الماء والرمل والحصى ونحو ذلك، ويُستخدَم في الإنشاء، وهو يشك (يتماسك) ويتصلب ويلتصق بالمواد الأخرى لربطها معًا. ويُستخدم لصنع المونة والخرسانة.

رصف - معالجة سطحية متينة لطريق. الوظيفة الأساسية للرصف هي نقل الأحمال إلى طبقة ما تحت الأساس والتربة السفلية.

رصف أسفلتي مستصلح (رصف أسفلتي مُعاد تدويره) - إعادة استخدام الخرسانة الأسفلتية القديمة: مطحونة أو مأخوذة من رصف قائم، باعتبارها طبقة أساس ركامية للرصف الأسفلتي الجديد.

رصف الخرسانة العادية ذو الفواصل - نوع من الرصف الخرساني الذي يستخدم فواصل الانكماش العرضية؛ للتحكم في موقع جميع الشقوق الطبيعية المتوقعة، ولا يستخدم أي حديد تسليح، ويمكن أن يستخدم أجهزة نقل الحمل (مثل قضبان الأوتاد) في الوصلات العرضية. ويُختار تباعد الفواصل المستعرضة بحيث لا تنتج إجهادات درجة الحرارة والرطوبة تشققًا وسطيًا بين الفواصل.

الرصف الخرساني المستمر التسليح - نوع من الرصفيات الخرسانية المسلحة بقضبان حديدية في جميع أجزاء الاتجاه الطولي للتحكم في مسافات الشقوق العرضية والفتحات بدلاً من فواصل الانكماش العرضي؛ لاستيعاب تغيرات حجم الخرسانة ونقل الحمل.

رصف صلب – هيكل إنشائي للرصف يتكون من بلاطة خرسانية مصنوعة من أسمنت بورتلاندي ذات مقاومة انحناء عالية نسبيًا، وتستند على طبقة أساس أو على طبقة ما تحت الاساس.

رصف مرن - هيكل إنشائي للرصف مصنوع من الخرسانة الأسفلتية الذي يحافظ على اتصال وثيق بالقاعدة الترابية ويوزع الأحمال عليها، ويعتمد على تشابك الركام، واحتكاك الجسيمات والتماسك؛ لتحقيق الاستقرار.

رصيف مرن متعدد الطبقات - نظام متعدد الطبقات يتمتع بقوة انحناء منخفضة ويتكون من طبقات مختلفة، (مثل: طبقة سطحية وطبقة أساس وطبقة ما تحت الأساس وقاعدة ترابية)، كل منها يقابل خدمة أو مختلفة متكاملة.

رقم إنشائي - قيمة حرجة للرصف المرن الذي يمثل المتطلبات الإنشائية الشاملة اللازمة؛ لتحمل أحمال المرور المتوقعة للتصميم، ويعتمد على مجموعة من دعم التربة القائمة وإجمالي الأحمال المرورية وقابلية الخدمة للرصف والظروف البيئية.

ركام - المواد الحبيبية المستخدمة كمواد إنشاء، والتي تفي بمتطلبات الطرق وتطبيقات الرصف.

ركام ناعم - جسيمات الركام التي تمر بمنخل مقاسه ٤,٧٥ مم (رقم ٤)، ولا يمكنها المرور من فتحات المنخل بمقاس ٠,٠٧٥ مم (رقم ٢٠٠)، مثل الرمل.

السُمك التصميمي - هو سُمك التصميم الإجمالي لرصفيات الأسفلت والخرسانة فوق القاعدة الترابية التي يحددها عدد كبير من العوامل مثل: الأحمال المرورية، وقيم القاعدة الترابية، والمواد ونحو ذلك.

سُمك الخرسانة - سُمك البلاطة الخرسانية للرصف الصلب الذي يتراوح عادةً بين ١٥٠ ملم (٦ بوصات) (للأحمال الخفيفة) و٣٠٠ ملم (١٢ بوصة) (للأحمال الثقيلة وحركة المرور الكبيرة).

شاحنة – مركبة نقل ثقيل تشارك بشكل أساسي في نقل البضائع والمواد أو في تقديم خدمات أخرى بخلاف النقل العام.

شبكة جيولوجية - تركيبات أرضية تتكون من شبكات منتظمة من العناصر المتصلة المتكاملة بفتحات أكبر من ٦,٣٥ مم (٤/١ بوصة)؛ لتمكنها من التشابك مع التربة والصخور والأرضية وغيرها من المواد المحيطة؛ لتكون بمثابة تسليح.

شقوق المتانة - نوع من عيوب الرصف ناتج عن عدم قدرة الخرسانة على تحمل العوامل البيئية. عادة ما تظهر كنمط من الشقوق التي تسير بالتوازي مع شقوق المفاصل أو الشقوق الخطية.

صلابة (Tenacity) - مقياس للقوة المتزايدة في أثناء تمديد العينة إلى ما بعد الذروة الأولية، ويمكن أن تشير إلى نوع البوليمر المستخدم لتعديل الأسفلت وكميته. ويُعرف على أنه الشُغل المطلوب لتمديد المادة بعد التغلب على المقاومة الأولية.

طبقة أساس – طبقة المواد التي تقع أسفل السطح أو طبقة متوسطة مباشرةً. يمكن أن تتكون من حجارة مكسرة وخَبَث مكسر وحصى مكسر أو غير مكسر ورمل، أو من خلطة أسفلتية ساخنة، وعادة ما يكون بركام من حجم أكبر.

طبقة رابطة أسفلتية – يشار إليها أيضًا باسم طبقة الأسمنت الأسفلتي الرابطة، أو الأسمنت الأسفلتي، وتُنتَج من البقايا السميكة التي تبقى بعد تقطير النفط. وتشمل الأسمنت الأسفلتي المعدل أو غير المعدل، والأسفلت السائل، ومواد الأسفلت المستحلب المستخدمة في إنتاج الخرسانة الأسفلتية؛ لتلبية المواصفات لأغراض الرصف.

طبقة ما تحت الأساس - ركام غير مترابط، أو مُعالج، أو مواد حبيبية توضع على القاعدة الترابية كأساس أو منصة عمل لطبقة الأساس.

عدد العينات المسموح به – عدد العينات، يُعبر عنه بالنسبة المئوية، التي يمكن أن تكون بها قوة أقل من قيمة المواصفات.

الفراغات المملوءة بالأسفلت (VFA) - النسبة المئوية لحجم الفراغ الحبيبي بين جزيئات الركام الذي يشغله حجم رابط الأسفلت الفعال. يُعبر عنها كنسبة100 x [(VMA-Va) / VMA] = VFA :؛ حيث Va هو حجم الفراغات الهوائية و VMA هو النسبة المئوية للفراغات في الركام المعدني.

الفراغات في الركام المعدني - حجم الفراغ بين حبيبات الجزيئات التجميعية لخليط الرصف المدموك الذي يتضمن فراغات الهواء ومحتوى الأسفلت الفعال، معبرًا عنه كنسبة مئوية من الحجم الإجمالي للعينة.

فواصل التمدد - نوع من الفواصل المبنية في الاتجاه العرضي للرصفيات الخرسانية؛ للسماح للبلاطة بالتمدد دون حدوث تشقق بسبب الإجهاد الانضغاطي الحاصل.

قاعدة ترابية - جزء من قاع الطريق يتكون من تربة أصلية أو مُعالجة يُوضع عليها طبقة سطحية، أو طبقة أساس، أو طبقة ما تحت الأساس، أو طبقة من أي مادة أخرى.

قضبان التسليح - قضبان فولاذية مستخدمة في الخرسانة؛ لتوفير قوة إضافية أو باعتبارها أجهزة لنقل الأحمال عبر الشقوق التي تحدث على بلاطة خرسانة الأسمنت البورتلاندي.(PCC)

قضبان الدسار - قضبان فولاذية قصيرة تستخدم في الرصفيات الخرسانية؛ لإجراء التوصيل الميكانيكي المناسب، ونقل الحمل بين البلاطات الخرسانية، ولمنع الانتفاخ والتصدع.

قيمة تصميم القاعدة الترابية (k) - يشار إليها أيضًا باسم معامل رد فعل القاعدة الترابية ، وتستخدم كمدخل رئيسي في تصميم الرصف الخرساني الذي يتضمن تقدير دعم أي طبقة (طبقة ما تحت الأساسو/أو القاعدة الترابية) تحت البلاطة الخرسانية. ويمكن تحديده من خلال الاختبارات الميدانية أو الارتباط مع الاختبارات الأخرى.

المادة الرابطة المعدلة بالبوليمر (الأسفلت المعدل بالبوليمر) - أسمنت أسفلتي تقليدي ممزوج ببوليمر صناعي أو فتات المطاط، يُستخدم لتحسين أداء المادة الرابطة (تقليل قابلية التعرض لدرجة الحرارة، زيادة المرونة، التحمل، التماسك، وما إلى ذلك) على أسطح الرصف كبيرة الأحجام المرورية أو ذات التلفيات الكبيرة، غالبًا في الظروف المناخية القاسية.

المتوسط السنوي المرجح لدرجة حرارة الرصف - طريقة مستخدمة في تصميم الرصف المرن لتحديد درجة حرارة تصميم الأسفلت التي تؤثر بشكل كبير على قوة وصلابة الأسفلت، باستخدام المتوسط السنوي المرجح لدرجة حرارة الرصف ولا تأخذ في الاعتبار العوامل المساهمة بما في ذلك سماكة الأسفلت التي تزيد عن ١٠٠ ملم والاختلافات في تكوين الخلطة.

مُحسِّن - مادة تستخدم لتحسين الالتصاق، وزيادة لزوجة الإسفلت؛ لمنع التخدد والشقوق الحرارية للرصف. تتضمن المُحسنات والمواد المُضافة المستخدمة بوليمرات اللدائن الحرارية واللدائن المرنة والمُعدلات الكيميائية والمُوسعات والألياف ومواد رابطة طبيعية ومؤكسدات ومضادات أكسدة الحشوات والهيدروكربونات ومواد مُضافة مضادة التفكك الصفائحي.

مستحلب الأسفلت - خليط من الأسمنت الأسفلتي المعالج والماء المخلوط بعامل استحلاب ينتج معلقًا من كريات دقيقة من مادة الأسفلت المنغمسة في الماء أو في محلول مائي، أو (٢) معلقًا من كريات دقيقة من الماء أو من محلول مائي في مادة الأسفلت السائل.

معامل التمزق (Sc) - يُشار إليه أيضًا بقوة الانحناء، وهو خاصية مادة تعبر عن قدرتها على مقاومة التشوه تحت حمل. يُقاس بصفته أقصى إجهاد مُحقق مباشرةً قبل خضوع المادة.

مُعامل المرونة - قياس معملي لطبيعة مواد الرصف لتحديد درجة صلابتها ومرونتها، وتُحدد بنسبة سعة الإجهاد المحوري المتكرر إلى سعة الإجهاد المحوري القابل للاسترداد.

مقاومة الانضغاط - أقصى إجهاد انضغاط يمكن أن تقاومه مادة مثل الخرسانة دون حدوث صدع.

موثوقية - ١. مقياس لتصور المستخدم عن أداء المرور، يشير إلى ظروف مرور مستقرة نسبيًا على مدار عدة أيام بما يساهم في توجيه توقعات السائق. ٢. احتمال أن يعمل قسم الرصف على نحو مرضٍ للمرور والظروف البيئية ولفترة التصميم.

مؤشر المرور - مقياس للعدد التراكمي للحمل المكافئ للمحور الأحادي (ESAL) المتوقع في مسار المرور على مدار العمر الافتراضي؛ لتصميم هيكل الرصف.

نسبة الماء إلى الأسمنت - نسبة ماء الخلط إلى الأسمنت في خلطة خرسانية معبراً عنه بالحجم أو الوزن، محسوبة من أجل تحديد قوة ومتانة الخرسانة عند معالجتها بشكل صحيح.

نسبة تحمل كاليفورنيا - المقياس الذي يمكن تعريفه بأنه نسبة الحمل المطلوبة لإجبار مكبس معاير على عينة من التربة والحمل المطلوب؛ لاختراق كتلة من الحجر المكسر عالي الجودة بنفس المكبس. وهي تعبّر في المقام الأول عن دعم طبقة أساس من الصخور المكسرة أو تربة قاعدة ترابية.

نظرية المرونة متعددة الطبقات (MLET) - امتداد لنظرية المرونة الخطية لنصف المساحة المتجانسة لبوسينسك التي طورها (بورميستر) بافتراض أن الطبقات متناحية (isotropic) ومتجانسة، ويُطبق التحميل الدائري، وتمتد المادة بلا حدود في الاتجاه الأفقي. تُستخدم نظرية المرونة متعددة الطبقات لحساب استجابات الهياكل الإنشائية ذات الطبقات بسبب التحميل الخارجي.

النمو المروري - يُعرَّف معدل نمو حركة المرور على أنه النسبة المئوية للتغير في حجم حركة المرور خلال فترة زمنية محددة تعتمد على الموقع والعوامل الاجتماعية والاقتصادية.

الوزن في أثناء الحركة (نظام)- نظام من المستشعرات والأدوات الداعمة المصممة؛ لالتقاط وتسجيل أوزان المحور والأوزان الإجمالية في أثناء قيادة المركبات فوق موقع القياس. يمكن لنظام الوزن في أثناء الحركة تقدير أحمال الإطارات والسرعة وتباعد المحاور وفئة المركبة وفقًا لترتيب المحور والمعلمات الأخرى المتعلقة بالمركبة.

الملحق ي - الاختصارات والرموز:

AADT	متوسط المرور السنوي اليومي
AADTT	متوسط مرور الشاحنات السنوي اليومي
AASHTO	الاتحاد الأمريكي لمسؤولي الطرق والنقل الحكوميين
ABCD	جهاز تكسير المادة الأسفلتية الرابطة
ACCT	اختبار أسطوانة الخرسانة المُسرّع
ACI	المعهد الأمريكي للخرسانة
A_f	مساحة القطاع العرضي للوتر (بوصة مربعة)
APP	أتاكتيك بولي بروبلين
A_s	مساحة القطاع العرضي إذا كان التسليح عرضيًّا (بوصة مربعة)
ASR	تفاعل القلويات – السيليكا
AVC	عدادات المركبات المؤتمتة
BBR	مقياس انحناء الكمرة
CAA	زاويّة الركام الخشن
CBR	نسبة تحمل كاليفورنيا
COC	جهاز كليفلاند مفتوح الكأس
CRCP	الرصفيات الخرسانية المسلحة مستمرة التسليح
CTB	أساس معالج بالأسمنت
CW	عرض الشق
DCP	مقياس نفاذ ديناميكي مخروطي
DD	التوزيع الاتجاهي
DI	مؤشر التلفيات
DP	نسبة الغبار
DSR	مقياس القص الديناميكي
DT	الشد المباشر

DT_D	انخفاض درجة الحرارة التصميمية، درجة فهرنهايت
DWF	نسيج سلكي مشوه
E	مُعامِلُ "يونج"
E_{AC}	معامل المرونة
E_c	معامل المرونة (رطل لكل بوصة مربعة) لخرسانة الأسمنت البورتلاندي
EICM	النموذج المناخي المتكامل المعزز
ESAL	الأحمال المكافئة للمحور الأحادي
E_{SB}	معامل مرونة ما تحت الأساس
EVA	الاثيلين فينيل اسيتات
F	معامل الاحتكاك
FAA	زاويّة الركام الناعم
F&E	مسطحة وممدودة (استطالة)
FHWA	إدارة الطرق الاتحادية (الولايات المتحدة الأمريكية)
f_s	أجهاد الحديد العامل
f_{SR}	الحد الأقصى لإجهاد تقييد القاعدة الترابية (رطل لكل بوصة مربعة)
FWD	مقياس انحراف الثقل الساقط
GF	عامل نمو
GL	فقد الركام للطبقة السطحية
G_{mb}	الكثافة النوعية الكلية
G_{mm}	للكثافة النوعية النظرية القصوى
GPR	رادار الاختراق الأرضي
G_{sb}	االكثافة النوعية الكلية (جافة)
HMA	خلطة الأسفلت الساخن
IDT	الشد غير المباشر
IRI	مؤشر الخشونة الدولي

IEM	قاعدة بيانات ميسونيت البيئية في ولاية أيوا
JCP	الرصفيات الخرسانية ذات الفواصل
JMF	صيغة خلطة العمل
JPC	الرصفيات العادية ذات الفواصل
JPCP	الرصفيات الخرسانية العادية ذات الفواصل
JRC	الخرسانة المسلحة ذات الفواصل
JRCP	الرصفيات الخرسانية المسلحة ذات الفواصل
JULEA	تحليل المرونة الطبقية - جاكوب اوزان
k	معامل رد فعل القاعدة الترابية
L	تباعد الفواصل (بوصة)
LCA	تقييم دورة الحياة
LCB	قاعدة خرسانية منحنية
LCCA	تحليل تكلفة دورة الحياة
LEF	معاملات تكافؤ أحمال المحاور
LET	نظرية المرونة الطبقية
LL	حد السيولة
LS	فقد الدعم
LTPP	أداء الرصف طويل الأجل
MCPT	اختبار منشور الخرسانة المصغر
MEPDG	دليل تصميم الرصف الميكانيكي-التجريبي
MERRA2	إعادة التحليل بأثر رجعي في العصر الحديث ٢
METAR	تقرير الطقس الروتيني للطيران
M_R	معامل المرونة
MRDTM	دليل المواد والاختبارات لإدارة المواد والأبحاث
NALS	أطياف أحمال المحور المُطبّعة

NARR	إعادة التحليل الإقليمي لأمريكا الشمالية
NCHRP	البرنامج الوطني التعاوني لأبحاث الطرق
NDT	اختبار الانحراف غير الإتلافي
N_{max}	أقصى عدد مطلوب من قضبان التسليح
N_{min}	أدنى عدد مطلوب من قضبان التسليح
NMAS	الحجم المعياري الأقصى للركام
NOAA	الإدارة الوطنية الأميركية للمحيطات والغلاف الجوي
PAV	وعاء التعتيق بالضغط
P_{ba}	مادة رابطة ممتصة، النسبة المئوية للركام بالكتلة
PCA	اتحاد الأسمنت البورتلاندي
PCC	خرسانة الأسمنت البورتلاندي
PCP	رصف خرساني مسبق الإجهاد
PG	درجة الأداء
PI	مؤشر اللدونة
PICP	رصف خرساني متشابك منفذ
PL	حد اللدونة
P_{max}	أقصى نسبة مئوية مطلوبة من الحديد
PMED	تصميم الرصف الميكانيكي-التجريبي
P_{min}	أدنى نسبة مئوية مطلوبة من الحديد
PMS	نظام إدارة الرصف
PS	العدد المسموح به من العينات
PSI	مؤشر قابلية الخدمة الحالي
psi	رطل لكل بوصة مربعة
p_t	مؤشر قابلية الخدمة النهائية
P_t	النسبة المئوية للحديد العرضي

R	الموثوقية
RAP	رصف أسفلتي مستصلح (رصف أسفلتي مُعاد تدويره)
RAS	ألواح أسفلتية مستصلحة
RCM	رصف خرساني معاد تدويره
RCP	رصف خرساني معالج
RD	التخدد المسموح به في الطبقة السطحية
RTFO	فرن الطبقات الرقيقة الدوار
SASO	الهيئة السعودية للمواصفات والمقاييس والجودة
SASW	التحليل الطيفي لموجات السطح
S	الاستطالة المسموح بها من المادة الرابطة المانعة للتسرب
SBS	ستيرين-بيوتادايين-ستيرين
SBR	مطاط ستيرين-بيوتادايين
SC	السعة الإنشائية
S_c	مواصفات الإنشاء على معامل تمزق الخرسانة (رطل لكل بوصة مربعة)
SD_s	الانحراف المعياري المقدر لمعامل تمزق الخرسانة (رطل لكل بوصة مربعة)
SL	حد الانكماش
SMA	الأسفلت المصطكي الحجري
SN	الرقم الإنشائي
So	الانحراف القياسي
SSD	عينات مشبعة ذات سطح جاف
T_H	متوسط درجة الحرارة المرتفعة اليومية خلال شهر إنشاء الرصف (درجة فهرنهايت)
T_L	متوسط درجة الحرارة اليومية المنخفضة خلال الشهر الأبرد من السنة (درجة فهرنهايت)
TSR	نسبة قوة الشد
V_a	فراغات الهواء
VFA	الفراغات المملوءة بالأسفلت

VMA	فراغات الركام المعدني
WIM	الوزن-في أثناء-الحركة
WMA	خلطة الأسفلت الدافئ
W_s	إجمالي عرض قسم الرصف (بوصة)
WWF	نسيج الأسلاك الفولاذية الملحومة
Y	تباعد الحديد العرضي (بوصة)
Y_t	إجهاد العمل المسموح به في وتر الشد (رطل لكل بوصة مربعة)
z	متغير التوزيع الطبيعي القياسي

الملحق ك – الوحدات:



كـــود الطـرق السعودي

تصميم الطرق والجسور والأنفاق
كود الطرق السعودي ٣٠٨ - تصميم الرصف

٢٠٢٣
الإصدار الأول