



بررسی مکانیزم خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای ترمودینامیک و طرح اختلاط

فریدون مقدس نژاد*^۱، محی الدین اسعدی^۲

^۱ دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۹ مهر ۱۳۹۶
بازنگری: ۲ بهمن ۱۳۹۶
پذیرش: ۹ اسفند ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۴ اسفند ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

مخلوط آسفالتی
خرابی رطوبتی
آزمایش لاتمن اصلاح شده
مدول برجهندگی
انرژی آزاد سطحی

چکیده: خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی از دست دادن مقاومت و دوام ناشی از حضور آب تعریف می‌شود. عدم ارتباط مکانیزم خرابی در آزمایشگاه و شرایط میدانی، عدم اندازه‌گیری خصوصیات موثر مواد و نقش آنها، عدم ارائه راهکار اصلاحی و سایر کمبودهای روش‌های آزمایشگاهی موجود برای تعیین حساسیت رطوبتی باعث شده است که محققین در سال‌های اخیر به فکر ارائه روش‌هایی بر پایه پارامترهای موثر در رخداد خرابی باشند. بر این اساس، این پژوهش تلاشی برای ارائه مدل پیش‌بینی حساسیت رطوبتی با استفاده از پارامترهای ترمودینامیک و طرح اختلاط است که بتواند عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت را پیش‌بینی و تحلیل کند. ۲۴ ترکیب مختلف مخلوط آسفالتی با استفاده از سه نوع سنگدانه با عملکرد مختلف در برابر رطوبت، دو نوع قیر و سه نوع افزودنی در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه به ترتیب با استفاده از روش قطره چسبان و دستگاه جذب همگانی اندازه‌گیری شده‌اند. برای ارائه مدل پیش‌بینی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی از شبیه‌سازی شرایط طبق استاندارد AASHTO T283 استفاده و آزمایش مدول برجهندگی به صورت کشش غیرمستقیم در شرایط خشک و مرطوب انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی به طور کلی می‌تواند عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت را بهبود دهد اما نوع و درصد این افزودنی‌ها باید با توجه به نوع سنگدانه، نوع قیر و ویژگی‌های طرح اختلاط مخلوط آسفالتی تعیین شوند. بر اساس مدل ارائه شده می‌توان گفت پارامترهای انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه در شرایط خشک، قابلیت پوشش دهی سنگدانه توسط قیر، مساحت سطح ویژه سنگدانه‌ها و ضخامت ظاهری غشای قیر روی سطح سنگدانه به صورت مستقیم و انرژی آزاد شده سیستم در هنگام رخداد عریان‌شدگی، درصد اشباع و نفوذپذیری مخلوط آسفالتی به صورت معکوس بر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی تأثیر قابل توجه دارند.

۱- مقدمه

خرابی رطوبتی را می‌توان از دست دادن مقاومت و دوام در مخلوط‌های آسفالتی ناشی از تأثیر رطوبت تعریف کرد. در حالت کلی، خرابی رطوبتی را می‌توان به دو فرآیند اصلی تقسیم‌بندی کرد:

۱- از دست دادن چسبندگی

۲- از دست دادن پیوستگی [۱].

از دست دادن چسبندگی به این علت است که آب بین قیر و سنگدانه قرار می‌گیرد. به علت بیشتر بودن تمایل سنگدانه به آب در مقایسه با تمایل آن به قیر، لایه قیر از روی سطح سنگدانه جدا می‌شود. از دست دادن پیوستگی به این علت است که در نتیجه ارتباط بین قیر و آب خصوصیات قیر تغییر پیدا می‌کند و این مسئله باعث جداسازی قیر از سطح سنگدانه و یا شکست در غشای قیری می‌شود. خرابی رطوبتی می‌تواند در نتیجه هر کدام از این دو فرآیند یا ترکیبی از هر دو باشد [۲].

مهم‌ترین مطالعات صورت‌گرفته در مورد خرابی رطوبتی در

مخلوط‌های آسفالتی به بررسی فرآیند شناخته شده‌ای به نام عریان‌شدگی می‌پردازند. عریان‌شدگی فرآیند جدا شدن قیر از سطح سنگدانه است که دلیل این رخداد جاذبه بیشتر بین سطح تماس سنگدانه-آب نسبت به سنگدانه-قیر بیان شده است. فاکتورهای متفاوتی بر رخداد و شدت خرابی رطوبتی تأثیر می‌گذارند که این فاکتورها را می‌توان در دو دسته فاکتورهای داخلی و خارجی دسته‌بندی کرد. فاکتورهای داخلی در واقع پارامترهایی هستند که به خصوصیات مواد مورد استفاده در مخلوط آسفالتی شامل قیر و سنگدانه و ترکیب این دو ماده با هم ارتباط دارند. فاکتورهای داخلی که بر خرابی رطوبتی تأثیر می‌گذارند، به طور مستقیم به خصوصیات موادی که مخلوط آسفالتی از آنها ساخته شده است یعنی قیر، سنگدانه و خصوصیات طرح اختلاط آنها مثل میزان حفرات هوا و نفوذپذیری ارتباط دارد [۳]. فاکتورهای خارجی پارامترهایی هستند که به بررسی شرایطی خارج از سیستم مخلوط آسفالتی مانند ترافیک و نوسانات آب و هوایی می‌پردازند [۴]. بعضی از مهم‌ترین فاکتورهای خارجی که بر روی خرابی رطوبتی تأثیر می‌گذارند عبارتند از: تولید، اجرا،

به منظور تحقیق و دستیابی به اهداف این پژوهش لازم است تا فرضیه‌های زیرمورد بررسی و تحلیل درستی یا نادرستی قرار گیرند:

- پارامترهای ترمودینامیک شامل انرژی آزاد پیوستگی قیر، انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه در شرایط خشک، میزان انرژی آزاد شده سیستم در رخداد خرابی رطوبتی (انرژی جداشدگی)، پوشش‌پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه در رخداد و شدت خرابی رطوبتی موثر هستند،
- پارامترهای طرح اختلاط شامل مساحت سطح ویژه سنگدانه‌ها، ضخامت ظاهری غشای قیر بر روی سطح سنگدانه، میزان نفوذپذیری مخلوط آسفالتی و درصد اشباع در رخداد خرابی رطوبتی تعیین‌کننده هستند،
- پارامترهای ترمودینامیک و طرح اختلاط بر قسمت‌های مختلف فرآیند عریان‌شدگی قیر از روی سطح سنگدانه موثر هستند.

۳- روش تحقیق

در این پژوهش به منظور ارائه مدل پیش‌بینی حساسیت رطوبتی بر اساس پارامترهای انرژی آزاد سطحی و طرح اختلاط، از ارتباط بین پارامترهای موثر در رخداد خرابی رطوبتی با نتایج آزمایش‌های حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بر روی نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه استفاده شده است. در این پژوهش از ۶ نوع سنگدانه استفاده شده است. در واقع، سه نوع سنگدانه پایه مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از پوشش نانوکربنات کلسیم اصلاح شده و به عنوان سنگدانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دلیل استفاده از سنگدانه‌های مختلف این بوده است تا تاثیر نوع ساختار کانی شناسی بر خصوصیات حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بررسی شود. خصوصیات کانی شناسی سنگدانه‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. دو نوع قیر پایه متداول در کشور (قیرهای با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵) مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هر کدام از این نوع قیرها با استفاده از دو نوع افزودنی نانو اکسیدروی و یک ماده ضدعریان‌شدگی مایع آمینی اصلاح شده‌اند. ترکیبات نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شده در جدول ۲ ارائه شده است.

سطح ترافیک و شرایط محیطی. مرطوب بودن سنگدانه‌های حمل شده از قرصه، خشک کردن نامناسب، عدم همگنی اختلاط، بارگیری ناصحیح مخلوط آسفالتی بر روی کامیون، نحوه تراکم، درزهای طولی، وزن و تعداد عبورهای غلطک [۵ و ۶].

عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در برابر رطوبت یک موضوع پیچیده است و در طی شش دهه گذشته موضوع تحقیقات مختلفی بوده است. در طی این دوره، تکنسین‌ها و پژوهشگران آزمایشگاه‌ها، پژوهشکده‌ها و ادارات راه‌ترابری در تلاش برای رسیدن به یک آزمایش قابل اعتماد که با نتایج عملکرد میدانی مخلوط آسفالتی سازگار باشد، آزمایش‌های گوناگونی را شکل داده‌اند. البته این حقیقت که چسبندگی بین قیر و سنگدانه در حضور آب کاهش می‌یابد و پیوستگی در داخل قیر به علت رطوبت از بین می‌رود، از مدت‌ها پیش برای اجراکنندگان مخلوط آسفالت آشکار بوده است [۷].

در بین پژوهشگران مختلف توسعه یک روش برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی که بتواند بین مخلوط‌های آسفالتی با عملکرد ضعیف یا قوی تمایز قائل شود، به یک چالش تبدیل شده است. روش‌های موجود برای تعیین حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی عمدتاً از مقایسه خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط مرطوب به خشک استفاده می‌کنند. علیرغم گستردگی استفاده از این آزمایش‌ها، استفاده از آنها یکسری مشکلات به همراه دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- عدم اندازه‌گیری خصوصیات بنیادین مواد
- ۲- عدم ارائه دلایل و مکانیزم خرابی
- ۳- عدم ارائه راهکار اصلاحی مناسب
- ۴- عدم بیان تاثیر افزودنی‌ها [۱۱].

۲- بیان پژوهش و فرضیه‌ها

در این پژوهش سعی شده است تا مفاهیم مرتبط با رخداد خرابی رطوبتی از تئوری ترمودینامیک استخراج شوند. سپس، از این مفاهیم برای شناسایی پارامترهای ترمودینامیک در رخداد خرابی و پیش‌بینی عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر عریان‌شدگی کمک گرفته شود.

جدول ۱. کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش (%)

Table 1. Minerals forming the aggregates used in this study

Calcium oxide, CaO	Magnesium oxide, MgO	Ferric oxide, Fe ₂ O ₃	Aluminium oxide, Al ₂ O ₃	Silicon dioxide, SiO ₂	سنگدانه
۷۲/۴۷	۲/۲۴	۳/۸۷	۴/۸۴	۱۶/۵۸	سنگ آهک
۳۱/۷۵	۲/۹۲	۷/۰۸	۶/۰۵	۵۲/۱۹	گرانیت
۱۳/۵۳	۱/۷۶	۴/۰۹	۱۳/۶۷	۶۶/۹۶	کوارتزیت

جدول ۲. ترکیب‌های مختلف از مصالح برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی

Table 2. Different combinations of materials for making asphalt mix samples

ترکیب	نوع قیر	نوع سنگدانه	نوع افزودنی	اضافه شونده به
۱			-	-
۲		سنگ‌آهک	نانوکرینات کلسیم	سنگدانه
۳			نانواکسیدروی	قیر
۴			مایع آمینی	قیر
۵			-	-
۶	۶۰-۷۰	گرانیت	نانوکرینات کلسیم	سنگدانه
۷			نانواکسیدروی	قیر
۸			مایع آمینی	قیر
۹			-	-
۱۰		کوارتزیت	نانوکرینات کلسیم	سنگدانه
۱۱			نانواکسیدروی	قیر
۱۲			مایع آمینی	قیر
۱۳			-	-
۱۴		سنگ‌آهک	نانوکرینات کلسیم	سنگدانه
۱۵			نانواکسیدروی	قیر
۱۶			مایع آمینی	قیر
۱۷			-	-
۱۸	۸۵-۱۰۰	گرانیت	نانوکرینات کلسیم	سنگدانه
۱۹			نانواکسیدروی	قیر
۲۰			مایع آمینی	قیر
۲۱			-	-
۲۲		کوارتزیت	نانوکرینات کلسیم	سنگدانه
۲۳			نانواکسیدروی	قیر
۲۴			مایع آمینی	قیر

کشش غیرمستقیم معمول‌ترین روش آزمایش تحت بارگذاری تکراری برای محاسبه مدول برجهندگی می‌باشد. این آزمایش مانند مقاومت کشش غیرمستقیم شامل بارگذاری در راستای قطر نمونه می‌باشد. در پژوهش حاضر، این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D ۷۳۶۹ انجام شده است [۱۳]. در آزمایش مدول برجهندگی بارگذاری سینوسی با دوره بارگذاری ۱/۰ ثانیه و دوره استراحت ۹/۰ ثانیه به نمونه‌های در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در ۵ سیکل پیش بارگذاری و ۵ سیکل بارگذاری اصلی انجام شده است. نحوه بارگذاری و تغییر شکل‌ها در آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم در شکل ۱ نشان داده شده است.

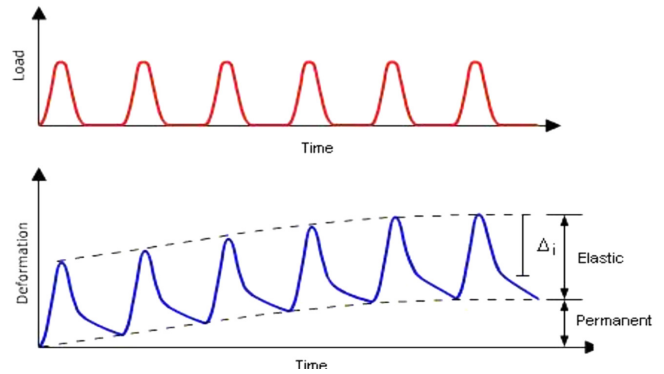
۴- آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مخلوط آسفالتی

۴-۱- آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی پارامتر مهمی است که در طراحی مکانیستیک روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پارامتر یک ورودی مهم در تئوری‌های الاستیک چند لایه‌ای یا مدل‌های اجزای محدود برای محاسبه پاسخ روسازی تحت بارگذاری ترافیکی است. برجهندگی خاصیتی از یک ماده است که میزان انرژی جذب شده را هنگامی که به صورت الاستیک تغییر شکل می‌یابد نشان می‌دهد. به علت سادگی و آسان بودن کاربرد در مورد نمونه‌های مخلوط آسفالتی آزمایشگاهی و میدانی، آزمایش

شکل ۱. نحوه بارگذاری در آزمایش مدول برجهندگی [۱۲]

Figure 1. How to load in the resin modulus test



برای به دست آوردن مدول برجهندگی از رابطه ۱ استفاده می شود.

$$Mr = \frac{P(\nu + 0.27)}{H \times L} \quad (1)$$

که در آن:

M_r = مدول برجهندگی (MPa)

P = میزان حداکثر نیروی عمودی تکرار شونده (N)

ν = نسبت پواسون مخلوط آسفالتی برابر با ۰/۳۵

H = تغییرشکل برگشت پذیرافقی (mm)

L = ارتفاع نمونه (mm) می باشند.

برای به دست آوردن حساسیت رطوبتی با استفاده از آزمایش مدول

برجهندگی، رابطه ۲ استفاده می شود.

$$RMR = \left(\frac{Mr_{wet}}{Mr_{dry}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن:

RMR = نسبت مدول برجهندگی (%)

Mr_{wet} = میانگین مقدار مدول برجهندگی نمونه های مرطوب (kPa)

Mr_{dry} = میانگین مقدار مدول برجهندگی نمونه های خشک (kPa)

۲-۴- ضخامت ظاهری غشای قیر

برای به دست آوردن ضخامت ظاهری غشای قیر از روش ارائه شده در گزارش NCHRP 567 استفاده شده است. در این گزارش، روشی را برای به دست آوردن ضخامت ظاهری غشای قیر به صورت رابطه ۳ ارائه کرده است. در این رابطه، صورت کسر حجم قیر مصرف شده در واحد حجم مخلوط آسفالتی را نشان می دهد و مخرج آن نشان دهنده سطح سنگدانه ها در واحد حجم مخلوط آسفالتی می باشد [۱۴].

$$AFT = \frac{1000 \times VBE}{S_s \times P_s \times G_{mb}} \quad (3)$$

که در آن:

AFT = ضخامت ظاهری غشای قیر (μm)

VBE = درصد حجم قیر موثر نسبت به حجم کل مخلوط آسفالتی (%)

S_s = مساحت سطح ویژه ظاهری سنگدانه ها (m^2/kg)

P_s = درصد وزن سنگدانه ها به وزن کل مخلوط (%)

G_{mb} = وزن ویژه حجمی مخلوط (kg/m^3)

برای به دست آوردن مساحت سطح ویژه ظاهری سنگدانه ها از

رابطه ۱۰ استفاده شده است:

(۴)

$$S_s = \left(\frac{1}{1000G_b} \right) \left[\begin{aligned} &1.4(P_{9.5} - P_{7.5}) + 2.0(P_{7.5} - P_5) + 2.8(P_5 - P_{4.5}) + \\ &3.9(P_{4.5} - P_{2.5}) + 5.5(P_{2.5} - P_{0.5}) + 8.9(P_{0.5} - P_{4.5}) + \\ &7.9(P_{4.5} - P_{2.5}) + 8(P_{2.5} - P_{1.5}) + 7.3(P_{1.5} - P_{0.6}) + \\ &141(P_{0.6} - P_{0.3}) + 283(P_{0.3} - P_{0.5}) + 566(P_{0.5} - P_{0.075}) + \\ &1600(P_{0.075}) \end{aligned} \right]$$

که در آن:

G_{sb} = وزن حجمی کل سنگدانه ها (kg/m^3)

P_x = نشان دهنده درصد عبوری از الک با قطر x میلی متر است. این

درصدها از نمودار دانه بندی به دست می آیند [۱۴].

سطح ویژه به دست آمده از این روش که در ادامه تحت عنوان

سطح ویژه ظاهری از آن یاد می شود، در واقع سطح ویژه واقعی

سنگدانه ها نیست. این سطح ویژه بخشی از سطح سنگدانه ها است

که به صورت موثر ضخامت قشای قیر بر روی آن شکل می گیرد [۱۴].

۳-۴- نفوذپذیری

در این پژوهش سعی شده است تا میزان نفوذپذیری مخلوط

آسفالتی نیز به عنوان یک پارامتر اصلی در پیش بینی خرابی رطوبتی

در نظر گرفته شود. در پژوهش های پیشین، نفوذپذیری مخلوط های

آسفالتی هم به روش هد ثابت و هم به روش هد افتان انجام شده

است [۲۰-۱۵]. با توجه به مقدار متراکم بودن مخلوط های آسفالتی

مورد استفاده در این پژوهش و نفوذپذیری پایین آنها از روش هد افتان

مطابق با استاندارد ASTMPS 129-01 استفاده شده است.

مقدار ضریب نفوذپذیری از رابطه ۵ بدست می آید:

$$K = \frac{2.3 a L}{H} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (5)$$

که در آن:

K = ضریب نفوذپذیری (cm/sec)

a = سطح مقطع لوله بورت (cm^2)

L = ارتفاع نمونه مخلوط آسفالتی (cm)

که در آن، ΔG^a انرژی آزاد چسبندگی، $\Delta GaLW$ مولفه غیرقطبی انرژی آزاد چسبندگی، $\Delta GaAB$ مولفه قطبی انرژی آزاد چسبندگی، Γ_1^{LW} و Γ_1^+ مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر، و Γ_2^{LW} و Γ_2^+ مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه هستند.

همچنین، رابطه ۱۰ برای محاسبه چسبندگی بین دو ماده ۱ و ۲ در حضور ماده ۳ ارائه شده است که اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ می‌توانند به ترتیب قیر، سنگدانه و آب باشند. اگر مقادیر انرژی آزاد چسبندگی منفی باشد، این بدان معنی است که تمایل بیشتری برای جدا شدن دو ماده اولیه در نتیجه حضور ماده سوم وجود دارد. هر چه مقدار منفی بیشتر شود، این تمایل افزایش می‌یابد.

(۱۰)

$$\Delta G_{132}^a = \Gamma_{12} - \Gamma_{13} - \Gamma_{23} = - \left[\begin{array}{l} (2\Gamma_3^{LW}) + (4\sqrt{\Gamma_3^+ \Gamma_3^-}) - (2\sqrt{\Gamma_1^{LW} \Gamma_3^{LW}}) \\ - (2\sqrt{\Gamma_3^+ \Gamma_1^-}) - (2\sqrt{\Gamma_1^+ \Gamma_3^-}) - (2\sqrt{\Gamma_2^{LW} \Gamma_3^{LW}}) \\ - (2\sqrt{\Gamma_3^+ \Gamma_2^-}) - (2\sqrt{\Gamma_2^+ \Gamma_3^-}) + (2\sqrt{\Gamma_1^{LW} \Gamma_2^{LW}}) \\ + (2\sqrt{\Gamma_1^+ \Gamma_2^-}) + (2\sqrt{\Gamma_2^+ \Gamma_1^-}) \end{array} \right]$$

۵- نتایج

۵-۱- آزمایش حساسیت رطوبتی

نتایج نسبت مدول برجهندگی در شرایط مرطوب به خشک بر اساس نوع قیر و درصد اشباع نمونه‌ها در شکل‌های ۲ تا ۵ در دو درصد اشباع متفاوت ارائه شده است. همانطور که از داده‌های ارائه شده در این شکل‌ها مشخص است افزودن مواد ضدعریان‌شدگی به خوبی توانسته است باعث بهبود در میزان نسبت مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی پایه شود.

در شکل ۲ نتایج نسبت مدول برجهندگی در نمونه‌های با قیر ۷۰-۶۰ و درصد اشباع برابر با ۳۵ آورده شده است. همانطور که از داده‌های ارائه شده در این شکل مشخص است استفاده از افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی در مورد سنگدانه‌های مختلف عملکرد تقریباً مشابهی داشته است. از داده‌های ارائه شده در این شکل مشخص است که سنگدانه‌های سنگ‌آهک دارای مقادیر نسبت مدول برجهندگی به مراتب بالاتری در مقایسه با سنگدانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی بوده‌اند. همچنین، نتایج این شکل نشان می‌دهد که عملکرد سنگدانه‌های کوارتزیتی ضعیف‌تر از سنگدانه گرانیتی می‌باشد. در شکل ۳ مشخص است که عملکرد سنگدانه‌های کوارتزیتی در این دسته نیز نسبت به سایر سنگدانه‌ها ضعیف‌تر است. نتایج این شکل نشان می‌دهد که افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی بر روی همه نمونه‌ها تأثیر مثبت داشته‌اند اما تأثیر این مواد بر روی نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های کوارتزیتی چشمگیرتر است. همچنین، از داده‌های این شکل مشخص است که

$h^1 =$ بارآبی در آغاز آزمایش (mm)

$h^2 =$ بارآبی در خاتمه آزمایش (mm)

$t =$ کل زمان برای پایین آمدن آب در بورت از h^1 به h^2 (sec)

$A =$ سطح مقطع نمونه مخلوط آسفالتی (cm^2).

۴-۴ پارامترهای ترمودینامیک

از تئوری‌هایی که به صورت گسترده برای تشریح مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد مختلف به کار رفته است می‌توان به تئوری اسیدی-بازی اشاره کرد. بر طبق این تئوری، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده‌ای بر اساس نوع نیروهای مولکول‌های سطحی به سه مولفه تقسیم می‌شود. انرژی آزاد سطحی کل با ترکیب این مولفه‌ها به طریق زیر به دست می‌آید:

$$\Gamma = \Gamma^{LW} + \Gamma^\pm = \Gamma^{LW} + 2\sqrt{\Gamma^+ \Gamma^-} \quad (۶)$$

که در آن، Γ انرژی آزاد سطحی کل ماده، Γ^{LW} مولفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی، Γ^\pm مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی، Γ^+ مولفه اسیدی، و Γ^- مولفه بازی است.

بر طبق اصول ارائه شده توسط ون اوس قسمت اسیدی-بازی از پارامتر اسید و باز لوییس تشکیل شده است که در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$\Gamma^\pm = \Gamma^{AB} = 2\sqrt{\Gamma^+ \Gamma^-} \quad (۷)$$

از دید ترمودینامیکی انرژی آزاد پیوستگی (ΔG^c)، مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک ترک با سطح واحد در داخل یک ماده تعریف می‌شود. کار پیوستگی یک مایع، کار مورد نیاز برای جداسازی یک ستون مایع با مساحت سطح مقطع واحد در شرایط خلأ به دو قسمت تعریف می‌شود. این تعریف را می‌توان برای مواد جامد نیز بسط داد. بر اساس تعریف انرژی آزاد سطحی، روشن است که بتوان کار پیوستگی برای مواد گوناگون را به شرح زیر نشان داد:

$$W^c = 2\Gamma^c \quad (۸)$$

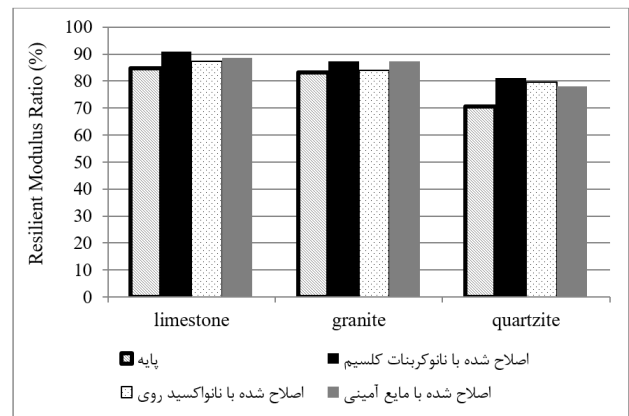
که در آن، ΓA انرژی آزاد سطحی کل ماده مورد نظر است.

انرژی آزاد چسبندگی (ΔG^a) همانطور که پیشتر تعریف شد، دو مولفه اصلی دارد: مولفه قطبی یا اسیدی-بازی و مولفه غیرقطبی یا لیفشیتز-ون دروالز. رابطه ۱۵ برای مشخص کردن انرژی آزاد چسبندگی بین قیر و سنگدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

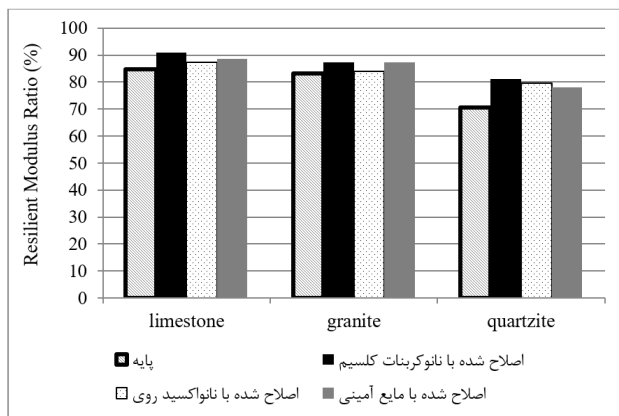
$$\Delta G^a = -W^a = \Delta G^{aLW} + \Delta G^{aAB} = -2 \left[\left(\sqrt{\Gamma_2^k \Gamma_1^k} \right) + \left(\sqrt{\Gamma_2^+ \Gamma_1^-} \right) + \left(\sqrt{\Gamma_2^- \Gamma_1^+} \right) \right] \quad (۹)$$

ساخته شده با قیر ۱۰۰-۸۵ و درصد اشباع برابر با ۷۰ در شکل ۵ ارائه شده است. همانطور که از داده‌های ارائه شده در این شکل مشخص است استفاده از نانواکسیدروی، مایع آمینی و نانوکربنات کلسیم بیشترین تاثیر را به ترتیب در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت داشته‌اند. نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیتی و سنگ آهک تفاوتی چندانی در عملکرد در برابر رطوبت ندارند اما عملکرد ضعیف نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه کوارتزیتی در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با دو گروه دیگر آشکار است. نتایج شکل ۴ با ۳۵ درصد اشباع مشابه با نتایج شکل ۵ در نمونه‌های با ۷۰ درصد اشباع نشان می‌دهد که افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی تاثیر چشمگیری در افزایش نسبت مدول برجهندگی در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های کوارتزیتی گذاشته‌اند.

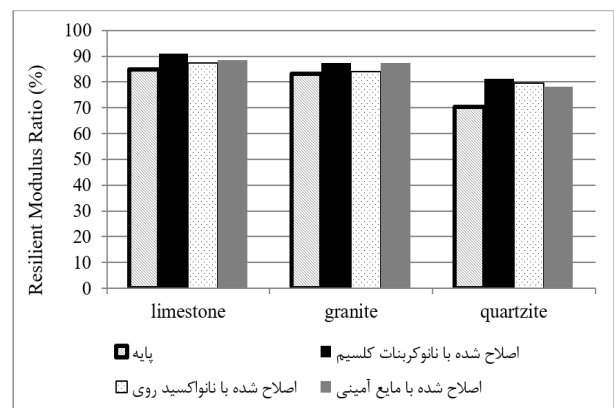
استفاده از نانواکسیدروی در مورد نمونه‌های با سنگدانه‌های اسیدی ساخته شده با قیر ۷۰-۶۰ با ۷۰ درصد اشباع باعث افزایش بیشتری در نسبت مدول برجهندگی در مقایسه با سایر افزودنی‌ها شده است.



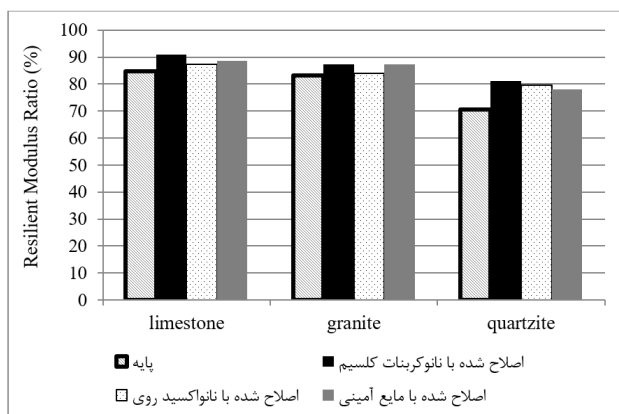
شکل ۲. نسبت مدول برجهندگی در نمونه‌های با قیر ۷۰-۶۰ و ۳۵ درصد اشباع
Figure 2. Ratio of resin modulus in bitumen samples with 60-70% and 35% saturation



شکل ۴. نسبت مدول برجهندگی در نمونه‌های با قیر ۱۰۰-۸۵ و ۳۵ درصد اشباع
Figure 4. Ratio of resilience modulus in bitumen samples with 85-85% and 35% saturation



شکل ۳. نسبت مدول برجهندگی در نمونه‌های با قیر ۷۰-۶۰ و ۷۰ درصد اشباع
Figure 3. Ratio of resilience modulus in bitumen samples with 60-70% and 70% saturation



شکل ۵. نسبت مدول برجهندگی در نمونه‌های با قیر ۱۰۰-۸۵ و ۷۰ درصد اشباع
Figure 5. Ratio of resin modulus in bitumen samples with 85-85% and 70% saturation

در شکل ۴ نتایج نسبت مدول برجهندگی در نمونه‌های با قیر ۱۰۰-۸۵ و درصد اشباع برابر با ۳۵ آورده شده است. همانطور که از داده‌های این شکل مشخص است استفاده از افزودنی نانوکربنات کلسیم در نمونه‌های با هر سه نوع سنگدانه عملکرد بهتری در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت داشته است. عملکرد ضعیف سنگدانه‌های کوارتزیتی در نسبت مدول برجهندگی این گروه و تاثیر مثبت افزودنی‌ها در نمونه‌های با این سنگدانه بر روی شکل ذکر شده آشکار می‌باشند.

نتایج مربوط به نسبت مدول برجهندگی در نمونه‌های

۵-۲- تاثیر درصد اشباع

است، می‌توان گفت واریانس‌های دو گروه از نمونه‌ها برابر هستند و باید از اطلاعات ردیف اول استفاده کرد. بر اساس آزمون t برای برابری میانگین‌ها مشاهده می‌شود که مقدار p -value برابر با $0/000$ است که کوچکتر از مقدار سطح اطمینان مورد نظر ($0/05$) برای این آزمون است. بر این اساس می‌توان گفت تفاوت در میزان درصد اشباع باعث ایجاد تفاوت قابل توجه در میزان نسبت مدول برجهندگی نمونه‌های مختلف شده است. این نکته قابل ذکر است که میانگین نسبت مدول برجهندگی در نمونه‌های با 30 و 70 درصد اشباع به ترتیب برابر با $85/35$ و $77/43$ بوده‌اند.

همانطور که از داده‌های ارائه‌شده در قسمت قبل مشخص بود، نمونه‌های مخلوط آسفالتی در سه شرایط خشک، 35 درصد اشباع و 75 درصد اشباع مورد آزمایش مدول برجهندگی قرار گرفته و نسبت مدول در شرایط 35 و 70 درصد اشباع نسبت به نمونه‌های خشک اندازه‌گیری شده‌اند. به منظور بررسی تاثیر درصد رطوبت بر میزان نسبت مدول برجهندگی شرایط مرطوب به خشک آزمون t انجام شده است که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به اینکه مقدار p -value آزمون لوین بزرگتر از مقدار سطح اطمینان در نظر گرفته‌شده ($0/05$)

جدول ۳. آزمون t برای بررسی تاثیر درصد اشباع بر نسبت مدول برجهندگی

Table 3. T test to investigate the effect of saturation percentage on the ratio of the resin modulus

آزمون t برای برابری میانگین‌ها			آزمون لوین برای برابری واریانس‌ها		آزمون t
p-value	درجه آزادی	t	p-value	F	
$0/000$	۴۶	$5/408$	$0/782$	$0/077$	واریانس‌ها برابر باشند
$0/000$	$45/900$	$5/408$			واریانس‌ها نابرابر باشند

۵-۳- تاثیر نوع قیر

دو گروه از داده‌های برابر هستند و باید از ردیف اول نتایج استفاده کرد. از داده‌های مربوط به p -value مربوط به آزمون t مشخص است که تفاوت قابل ذکری بین دو گروه از داده‌ها موجود نیست و می‌توان گفت نوع قیر تاثیر معناداری در میزان نسبت مدول برجهندگی نداشته است.

به منظور بررسی نوع قیر بر میزان حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مختلف در آزمایش نسبت مدول برجهندگی از آزمون t استفاده شده است. نتایج این آزمون در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که از داده‌های این جدول بر اساس آزمون لوین مشخص است، واریانس‌های

جدول ۴. آزمون t برای بررسی تاثیر نوع قیر بر نسبت مدول برجهندگی

Table 4. T test to investigate the effect of bitumen on the resin modulus ratio

آزمون t برای برابری میانگین‌ها			آزمون لوین برای برابری واریانس‌ها		آزمون t
p-value	درجه آزادی	t	p-value	F	
$0/098$	۴۶	$1/687$	$0/715$	$0/135$	واریانس‌ها برابر باشند
$0/099$	$45/207$	$1/687$			واریانس‌ها نابرابر باشند

۴-۴-۲- وجود هم‌خطی در داده‌های متغیرهای مستقل

با بررسی انجام‌شده در قسمت قبل مشاهده شد که بین متغیر پوشش‌پذیری و سایر متغیرها هم‌خطی وجود دارد که این پارامتر از متغیرهای مستقل مورد بررسی حذف شد. با توجه به یکسان بودن داده‌های مربوط به متغیرهای این قسمت با قسمت قبل، متغیر پوشش‌پذیری از متغیرهای مورد بررسی حذف شده است.

۴-۴-۳- ارائه مدل

با توجه به مقدار سطح اطمینان $0/05$ در نظر گرفته‌شده ($a=0/05$) و درجه‌های آزادی برابر با 7 و 40 به ترتیب برای رگرسیون

در این قسمت سعی شده است تا با استفاده از آنالیزهای آماری میزان موثر بودن پارامترهای مورد نظر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تعیین شده و سپس به ارائه مدل مناسب بر اساس نسبت مدول برجهندگی در شرایط مرطوب به خشک پرداخته شود.

۴-۵- ارائه مدل پیش‌بینی حساسیت رطوبتی

۵-۴-۱- نوع مدل

در این قسمت از مدل رگرسیون خطی چندگانه به علت سادگی در کاربرد و نتایج مناسب برای ارتباط بین متغیرهای مستقل و نسبت مدول برجهندگی استفاده شده است.

و باقیمانده‌ها از روی تابع توزیع F، مقدار ناحیه بحرانی به صورت رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:

$$F \geq F_{(0,05)}(7,40) = 2.25 \quad (11)$$

با مقایسه نتایج ارائه‌شده در جدول ۵ مقدار F برابر با ۶۵/۴۹۱ به دست آمده است که نشان‌دهنده این است که برازش مناسبی بین داده‌های متغیرهای مستقل و متغیر وابسته وجود دارد.

جدول ۵. تحلیل واریانس مدل نسبت مدول برجهندگی
Table 5. Analysis of variance of the resonance modulus ratio model

تحلیل واریانس						
p-value	F	میانگین مربع‌ها	درجه آزادی	مجموع مربع‌ها	منبع ایجاد	مدل
۰/۰۰۰	۶۵/۴۹۱	۲۵۵/۵۸۶	۷	۱۷۸۹/۱۰۲	رگرسیون	رگرسیون چندگانه
		۳/۸۰۸	۴۰	۱۵۲/۳۴۹	مانده‌ها	
			۴۷	۱۹۴۱/۴۵۱	کل	

معیار برآورد شده برای مدل پیش‌بینی خرابی رطوبتی براساس نسبت مدول برجهندگی نیز ۱/۷۹۹۸ به دست آمده است. ستون آخر این جدول ضریب دوربین-واتسون است که در قسمت مانده‌ها در مورد کاربرد آن صحبت خواهد شد.

همانطور که از داده‌های ارائه‌شده در جدول ۶ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین برای مدل ارائه‌شده در این پژوهش ۰/۹۲۰ بوده است که مقدار مناسبی از نظر آماری به حساب می‌آید. همچنین، مقدار ضریب تعیین تعدیل‌شده که اثر تعداد متغیرهای وابسته و تعداد داده‌ها را لحاظ می‌کند، برابر با ۰/۹۰۶ می‌باشد. مقدار خطای

جدول ۶. جمع‌بندی نتایج مدل نسبت مدول برجهندگی
Table 6. Summary of model results of the resonance modulus ratio

جمع‌بندی مدل ^a					
مدل	ضریب همبستگی چندگانه (R)	ضریب تعیین (R ²)	ضریب تعیین تعدیل‌شده	خطای معیار برآورد شده	دوربین-واتسون
رگرسیون چندگانه	۰/۹۵۱	۰/۹۱۶	۰/۹۰۴	۱/۷۹۹۸	۱/۳۱۰

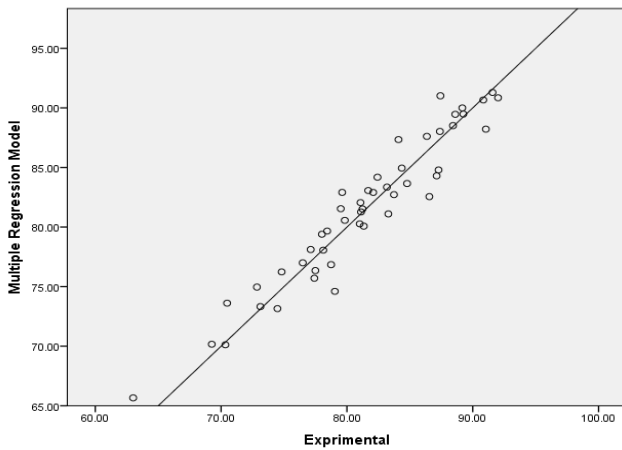
می‌گذارند. با توجه به داده‌های این جدول می‌توان گفت تمامی متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش دارای تاثیر معناداری بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در مدل نسبت مدول برجهندگی هستند. با توجه به مقدار سطح اطمینان ۰/۰۵ در نظر گرفته‌شده (a=۰/۰۵) و درجه آزادی برابر با 40 (n-p-1=48-7-1) برای باقیمانده‌ها، از جداول مربوط به تابع توزیع t مقدار ناحیه بحرانی برای آماره‌های این توزیع برابر با ۱/۶۴۸ به دست می‌آید. همانطور که از داده‌های این ستون مشخص است همه مقادیر t به دست‌آمده در رابطه‌ی ۷ صدق می‌کنند. پس فرض صفر این آزمون آماری که بیان‌کننده عدم ارتباط بین هر کدام از متغیرهای مستقل و متغیر پاسخ است، رد می‌شود.

در جدول زیر ضرایب مدل رگرسیون چندگانه به همراه آزمون‌های معناداری ضرایب ارائه شده است. انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی، مساحت سطح ویژه و ضخامت ظاهری غشای قیر دارای تاثیر مثبت در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبتی هستند. از طرفی می‌توان گفت که انرژی جداسازی و نفوذپذیری نیز دارای تاثیر معکوس هستند. پارامتر درصد اشباع که در این مدل وجود دارد اما در مدل براساس نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم وجود نداشت، تاثیر منفی بر روی میزان مقاومت مخلوط آسفالتی دارد و افزایش در آن سبب می‌شود تا میزان خرابی ناشی از تاثیر رطوبت افزایش یابد. با توجه به داده‌های ستون ضرایب معیار جدول مشخص است، درصد اشباع بیشترین تاثیر در کاهش مقاومت و انرژی آزاد پیوستگی بیشترین تاثیر را در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت

$$|t| \geq t_{(0,05/2)}(40) = 1.684 \quad (7)$$

جدول ۷. ضرایب مدل پیش بینی خرابی رطوبتی براساس نسبت مدول برجهندگی
Table 7. Coefficients of Moisture Damage Prediction Model Based on Resonance Modulus Ratio

p-value	t	ضرایب معیار		ضرایب غیرمعیار		مدل
		Beta	خطای معیار	ضریب (B)	خطای معیار	
۰/۰۰۰	۴/۲۶۵	---	۱۰/۴۱۸	۴۴/۴۳۴		عد ثابت
۰/۰۰۰	۸/۹۴۱	۰/۵۳۸	۰/۱۱۸	۱/۰۵۱		انرژی آزاد پیوستگی
۰/۰۰۷	۲/۸۴۰	۰/۲۳۲	۰/۰۶۲	۰/۱۷۵		انرژی آزاد چسبندگی
۰/۰۰۰	-۴/۸۷۳	-۰/۴۶۳	۰/۰۶۵	-۰/۳۱۷		انرژی جداسازی
۰/۰۰۰	۵/۲۹۳	۰/۳۹۹	۲/۸۰۷	۱۴/۸۵۹		مساحت سطح ویژه
۰/۰۰۰	-۳/۹۸۱	-۰/۲۰۳	۰/۰۱۰	-۰/۰۴۰		نفوذپذیری
۰/۰۰۰	۴/۴۳۶	۰/۳۷۳	۰/۳۶۴	۱/۶۱۷		ضخامت ظاهری غشای قیر
۰/۰۰۰	-۱۳/۹۲۲	-۰/۶۲۳	۰/۰۱۶	-۰/۲۲۷		درصد اشباع



شکل ۶. مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده در مدل نسبت مدول برجهندگی
Fig 6. Comparison of actual values and predicted values in the resonance modulus ratio model

۴-۴-۵ - آنالیز اقتصادی

درصد استفاده از نانو اکسید روی و مواد آمینی مایع به ترتیب ۵۰۰ و ۵۰۰۰ تومان به هزینه تمام شده یک تن مخلوط آسفالتی اضافه می کنند. این عدد در مورد پوشش سنگدانه با نانو کربنات کلسیم در حدود ۳۷۰۰ تومان می باشد. اگر هزینه هر تن آسفالت در حدود ۱۵۰۰۰۰ تومان باشد، استفاده از نانو اکسید روی، مایع آمینی و نانوکربنات کلسیم به ترتیب ۳، ۰/۳ و ۲/۵ درصد به هزینه هر تن مخلوط آسفالتی اضافه می کنند. مقدار مدول برجهندگی در شرایط خشک تحت تاثیر استفاده از مواد فوق الذکر به ترتیب ۵/۶، ۴/۵ و ۴/۷ بوده است که به همین نسبت از ضخامت مخلوط آسفالتی کم می کند. براین اساس می توان گفت استفاده از این مواد نه تنها هزینه تهیه مخلوط آسفالتی را کم می کند که حتی کاهش هزینه رانیز به همراه دارد.

بر اساس ضرایب ارائه شده می توان گفت که مدل رگرسیونی پیش بینی خرابی رطوبتی بر اساس نسبت مدول برجهندگی عبارت است از:

$$RMR = 44.434 + 1.051 CE + 0.175 AE - 0.317 DE + 14.859 SSA - 0.040 PA + 1.617 AFT - 0.227 DS \quad (8)$$

که در آن، RMR = نسبت مدول برجهندگی از ۰ تا ۱۰۰ که بزرگ بودن این پارامتر نشان دهنده مقاومت بالاتر مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی است، CE = انرژی آزاد پیوستگی قیر (AE)، (ergs/cm²) = انرژی آزاد چسبندگی بین قیر-سنگدانه (DE)، (ergs/cm²) = انرژی آزاد جداسازی (SSA)، (ergs/cm²) = مساحت سطح ویژه سنگدانه (PA)، (m²/gr) = نفوذپذیری مخلوط آسفالتی (μm/sec)، و AFT = ضخامت متوسط غشای قیر بر روی سطح سنگدانه (μm)، و DS = درصد اشباع نمونه های مخلوط آسفالتی (%).

مدل ارائه شده توسط حامدی و مقدس نژاد [۲۱] همراستا با مدل ارائه شده در این پژوهش است. تفاوت های اصلی این دو مدل در این است که در مدل ارائه شده در پژوهش موجود اثر درصد اشباع در نظر گرفته شده است. حال آنکه حامدی و مقدس نژاد شرایط اشباع را بر اساس استاندارد AASHTO T283 ثابت در نظر گرفته اند. تفاوت برجسته دیگر این است که در پژوهش موجود از بازگذاری تکراری استفاده شده است که تطابق بیشتری با نتایج میدانی دارد.

بر اساس مدل ارائه شده در رابطه ی ۸، مقادیر آزمایشگاهی، مقادیر پیش بینی شده بر اساس مدل نسبت مدول برجهندگی و مقادیر مانده (مابه التفاوت دو مقدار) محاسبه شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی مورد مقایسه قرار گرفته اند. نتایج این شکل نشان می دهد که مقادیر واقعی و پیش بینی شده توسط مدل با یکدیگر اختلاف فاحشی ندارند.

Test methods to predict moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements, in: Transportation Research Board National Seminar. San Diego, California, 2003, pp. 77-110.

[9] A. Standard, D7369, "Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2003).

[10] P.E. Sebaaly, Comparison of lime and liquid additives on the moisture damage of hot mix asphalt mixtures, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, (2007).

[11] D.W. Christensen, R.F. Bonaquist, Volumetric requirements for Superpave mix design, Transportation Research Board, 2006.

[12] B. Choubane, G.C. Page, J.A. Musselman, Investigation of water permeability of coarse graded superpave pavements, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 67 (1998).

[13] L.A. Cooley, E.R. Brown, Selection and evaluation of field permeability device for asphalt pavements, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1723(1) (2000) 73-82.

[14] G. Maupin, Asphalt permeability testing in Virginia, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1723(1) (2000) 83-91.

[15] J.R. Westerman, AHTD's experience with superpave pavement permeability, in: Arkansas Superpave Symposium, 1998, pp. 82-99.

[16] B. Huang, L.N. Mohammad, P. Chris Abadie, Fundamentals of Penneability in Asphalt Mixtures, in: The Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologist, 1999.

[17] E. Masad, B. Birgisson, A. Al-Omari, A. Cooley, Analysis of permeability and fluid flow in asphalt mixes, in: Proceedings of the 82nd Transportation Research Board Annual Meeting, CD-ROM Washington, DC, 2003.

[18] G.H. Hamedi, F. Moghadas Nejad, Evaluating the Effect of Mix Design and Thermodynamic Parameters on Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, 29(2) (2016) 04016207.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از تحلیل‌های آماری و نتایج آزمایش‌های خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مختلف، پارامترهای ترمودینامیک و طرح اختلاط موثر در خرابی شناسایی شوند. سپس، با در نظر گرفتن پارامترهای موثر به ارائه مدل پیش‌بینی پتانسیل حساسیت رطوبتی پرداخته شود.

بر اساس فعالیت‌های ذکر شده در راستای رسیدن به اهداف این پژوهش نتایجی به دست آمده که مهم‌ترین آنها در ادامه آورده شده‌اند. ۱- افزایش در پارامترهای انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی، مساحت سطح ویژه و ضخامت ظاهری غشای قیر باعث بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت در مدل ارائه شده در این پژوهش شده‌اند.

۲- افزایش در پارامترهای نفوذپذیری، درصد اشباع و انرژی جداسازی به نحو معناداری باعث تاثیر منفی بر روی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی می‌شوند.

۳- در مدل ارائه شده بر اساس نسبت مدول برجهندگی مشاهده می‌شود که درصد اشباع و انرژی پیوستگی به ترتیب بیشترین نقش را در کاهش و افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت داشته‌اند.

مراجع

- [1] P. Naidoo, S. Logaraj, A.D. James, Adhesion and cohesion modifiers for asphalt, in, Google Patents, 2013.
- [2] B.D. Shah, Evaluation of moisture damage within asphalt concrete mixes, Texas A&M University, 2003.
- [3] D.N. Little, D. Jones, Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements, in: National seminar on moisture sensitivity of asphalt pavements, 2003, pp. 37-70.
- [4] D.N. Little, D. Jones, Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements, in: Transportation Research Board National Seminar, San Diego, CA, USA, 2003, pp. 37-70.
- [5] J.-S. Chen, K.-Y. Lin, S.-Y. Young, Effects of crack width and permeability on moisture-induced damage of pavements, Journal of Materials in Civil Engineering, 16(3) (2004) 276-282.
- [6] R.G. Hicks, Moisture damage in asphalt concrete, Transportation Research Board, 1991.
- [7] J. Epps, E. Berger, J. Anagnos, Treatments, in: Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements-A National Seminar, 2003.
- [8] M. Solaimanian, J. Harvey, M. Tahmoressi, V. Tandon,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

M. Asadi , F. Moghadas Nejad, Investigate the Moisture Damage Mechanism in Asphalt Mixtures Using Thermodynamic Parameters and Mixing Design, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)425-436.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13580.5440

