تحلیل عددی روسازی انعطاف پذیر راه به روش میکروسازه‌ای

غلامعلی شفابخش [۱*] و احمد مهرابی [۲]

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:
تحلیل المان محدود،
تحلیل میکرو سازه ،
تحلیل روسازی انعطاف پذیر،
آنالیز حساسیت فصل مشترک.

چکیده

در تحلیل روسازی انعطاف‌پذیر راه به روش المان محدود معمولاً از خصوصیات کلی لایه‌ها استفاده می‌گردد. این موضوع اثرات رفتار میکروسازه‌ای و تاثیرات آن بر رفتار کلی روسازی را مشخص نمی‌کند. در این پژوهش سعی گردیده است با استفاده از روش میکروسازه‌ای و وارد نمودن خصوصیات اجزای سازنده‌ی جسم راه در مدلسازی، به نتایج دقیق‌تری دست یافت. برای این منظور، نحوه‌ی توزیع تنش و کرنش و اندرکنش‌های بین لایه‌ای در قالب مدل میکروسازه‌ای و در محیط Abaqus مورد بحث قرار گرفته است. با بررسی اندرکش‌های بین لایه‌ای این امکان پدید آمد که در طراحی جسم راه عملکرد مستقل و یا مرتبط لایه‌ها را نسبت به توزیع نیرو به عنوان پارامتر طراحی مد نظر قرار داد. به کمک این پارامتر عمق خاک بستر در مدلسازی در محدوده‌ی ۲ متر پیشنهاد گردید. سپس با انجام یک آنالیز حساسیت در فصل مشترک لایه‌های مستقل نسبت به نوع تماس لایه‌ها نشان داده شد که کرنش جسم راه نسبت به اصطکاک فصل مشترک حساسیت کمی دارد. اما در توزیع تنش، این موضوع صادق نبوده و میزان اصطکاک فصل مشترک بر نتایج تاثیر گذار می‌باشد. بطوریکه نتایج مطالعه موردی، درصد تغییرات تنش را در دو حالت بدون اصطکاک و دارای اصطکاک در محدوده‌ی دو تا پنج درصد نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

روش المان محدود یکی از عمومی‌ترین روش‌ها در برخورد با مسایل تحلیلی پیچیده می‌باشد. پژوهشگران با افزایش دامنه‌ی مدل سازی مواد، عمومیت بیشتری به این روش داده‌اند. این کار در قالب اجرای مدل‌های مختلف از جمله مدل میکروسازه‌ای مواد مرکب در چهارچوب المان محدود صورت گرفته است. جسم راه‌های آسفالتی و صلب متشکل از چند لایه‌ی مجزا می‌باشد. به صورت عمومی سه لایه‌ی رویه، اساس و زیر اساس در جسم راه مطرح می‌شود. هر کدام از لایه‌های جسم راه نیز به نوبه‌ی خود از اجزای قابل تفکیک از یکدیگر تشکیل گردیده است. به عنوان مثال رویه آسفالتی که مورد توجه این تحقیق می‌باشد، عموماً از دو ماده قیر و مصالح سنگی تشکیل می‌گردد. قیر در ابتدا یک ماده ویسکوز و مصالح خصوصیت الاستیک دارند ولی پس از اختلاط مخلوط خاصیت ویسکوالاستیک پیدا می-

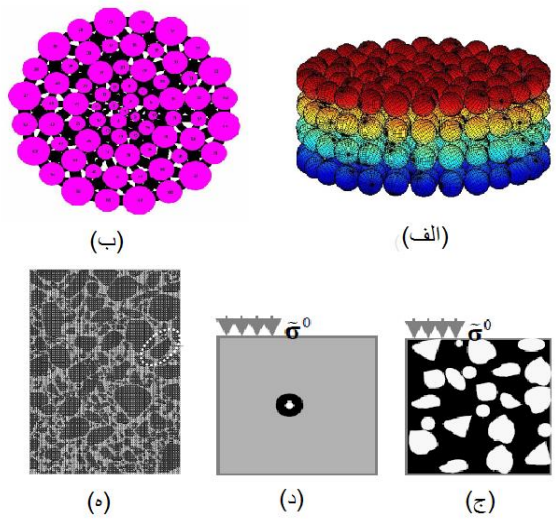
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shafabakhsh@semnan.ac.ir
۱. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
۲. دانش آموخته ی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

کند. با توجه به مطالب بیان شده، رویه‌ی راه را می‌توان به عنوان یک ماده مرکب مورد بحث قرار داد.

روش‌های مختلفی برای تحلیل مواد مرکب در طی چند دهه اخیر ارایه گردیده‌اند. ماحصل این تحقیقات منجر به تکمیل روش میکروسازه‌ای گردیده است. در بخش تولید مدل هندسی در روش میکروسازه‌ای روش‌های مختلفی بکار گرفته شده است. برخی همچون "کینگلی دای" در شرایط بسیار محدود و با قرار دادن گوی‌های کروی با قطرهای یکسان و با چیدمانی منظم (شکل ۱- الف) به بررسی رفتار الاستیک پرداخت[۱]. در تحقیقات دیگری که توسط "مارتین سد" و همکاران انجام گرفت، از مقاطعی مشابه استفاده گردید، اما دانه‌بندی مقاطع به کمک گوی‌های کروی با اقطار متفاوت انجام شد (شکل ۱-ب). همانند تحقیقات "کینگلی دای" چیدمان دانه‌های سنگی به صورت منظم انجام گرفت[۲]. در تحقیقات دیگری که توسط "یین" و "بوتلار" صورت پذیرفت، مقاطع به صورت دستی طراحی گردیده است (شکل ۱- ج). به این صورت که چند نمونه دانه‌های سنگی توسط پژوهشگر برای برنامه تعریف و به صورت دستی در مقطع قرار گرفتند[۳]. "یین" در ادامه نتایج تحقیق خود را با تحقیقات "گاردنر" که توسط راهکار خودسازگار به مدل سازی پرداخته بود[۴]، مورد مقایسه قرارداده و شرایط راهکار خودسازگار را فراهم و مورد آزمایش قرار داده است (شکل ۱ - د). در ادامه محققینی همچون "ژاپینگ یو" و همکاران با توجه به تحقیقات قبل که در برخی مواقع منجر به ساده سازی مدل می‌گردید، با استفاده از مقاطع اسکن شده از نمونه‌های واقعی، دانه‌های سنگی رویه آسفالتی را تولید کردند[۵]. "یو" در تحقیقات بعدی مدلسازی خود را بهبود بخشید (شکل ۱ - ه)[۶].

در بررسی رفتار مصالح روسازی تحقیقات گسترده‌ای صورت پذیرفته است. بعضی همچون سوی و همکاران خصوصیات میکروسازه‌ای مواد تشکیل دهنده را در شرایط خمش بررسی نموده‌اند [۷]. "کلری" و همکاران این خصوصیات را در تحت تاثیر رد اثر چرخ بررسی نموده است [۸]. "ضلوو" و همکاران به شبیه سازی خصوصیات روسازی پرداخته است [۹]، و "مصعد" و همکاران شبیه سازی را در محیط غیر ایزوتروپ صورت داده‌اند[۱۰]. "مارتین سد" و همکاران شبیه سازی‌ها را به کمک مدل های خرابی بررسی نمودند [۲]. همچنین "شی" در تحلیل میکروسازه‌ای به مصالح دانه‌ای و ناپایداری آنها توجه نموده است[۱۱].

در بحث آنالیز حساسیت دامنه‌ی تحقیقات محدودتر بوده است. در این مورد میتوان به تحقیقات "مصعد" پیرامون حساسیت سنجی روسازی و مقایسه نتایج آن با آشتو اشاره نمود[۱۲]. " فیروز آبادی" و همکاران، پژوهشی مشابه را با استفاده از مدلسازی غیر خطی انجام دادند[۱۳]. "عامری" همچنین طی مطالعاتی، تاثیر مشخصات فنی لایه اساس را بر روی تنش‌های روسازی بتنی مورد بحث قرار داد[۱۴]. اما بررسی رفتار روسازی با رویکرد این پژوهش صورت نپذیرفته است. از طرف دیگر تاثیراتی که لایه‌های زیرین در عملکرد مدلسازی روسازی انعطاف پذیر می‌گذارند نیز کمتر مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ۱- (الف) چیدمان منظم و دانه بندی یکسان (ب) چیدمان منظم و دانه های نامتشابه (ج) چیدمان دستی (د) راهکار خودسازگار (ه) نمونه مقطع اسکن شده.

۲ - تحلیل میکرو سازه

تحلیل میکروسازه ای، روشی است که در آن نحوه ارتباط بین متغیرها در سطوح میکرو (نیرو و تغییر مکان) و ماکرو (تنش و کرنش) را بیان می‌کند. در این تحلیل تاثیر اندرکنش مصالح مواد مرکب تحت نیرو های تماسی مورد پردازش قرار می‌گیرد. سپس در نتایج تنش-کرنش بدست آمده از اندرکنش اجزا مواد مرکب به کل جسم تعمیم داده می‌شود (شکل۲). از ویژگی های روش میکروسازه‌ای می‌توان به تشابه بیشتر مدل سازی مواد مرکب به واقعیت و افزایش ضریب اطمینان به نتایج، اشاره نمود. بهبود مدل سازی از دو جهت مطرح می‌گردد. نخست آنکه مدل تولید شده شباهت هندسی و ظاهری بیشتری با نمونه ی واقعی دارد. و از طرف دیگر به دلیل تعریف خصوصیات اجزای تشکیل دهنده‌ی ماده مرکب، به جای استفاده از خصوصیات موثر کلی، خصوصیات رفتاری نمونه عملکرد بهتری را نشان خواهد داد.

تحلیل میکرو سازه‌ای رویه‌ی راه، به چند مرحله‌ی متمایز تقسیم می‌گردد. هر مرحله دارای گام‌های مشخصی است که می‌بایست انجام شود:

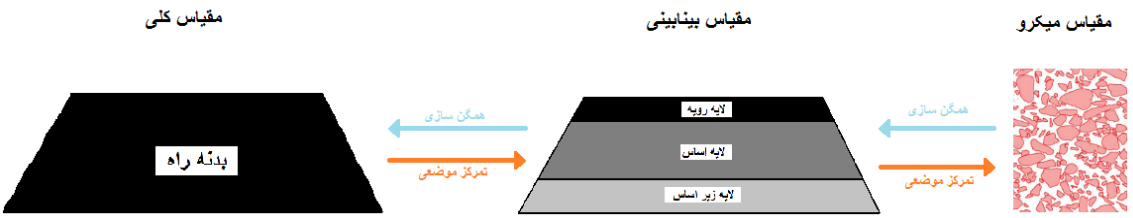
در مرحله‌ی نخست می‌بایست سطوح پردازش و مقیاس اعمال نیروها بر روی نمونه‌ها مشخص گردد. در گام بعدی نحوه‌ی ارتباط این مقیاس‌ها مشخص می‌گردد. برای حرکت از مقیاس میکرو به سمت مقیاس کلی از تکنیک-های همگن شدگی سطوح استفاده می‌گردد. برای حرکت از مقیاس کلی به مقیاس میکرو از تکنیک تمرکز موضعی استفاده می‌گردد .

در دومین مرحله می‌بایست خصوصیات مکانیکی مواد تشکیل دهنده‌ی رویه آسفالتی راه را به تفکیک مشخص نمود. در این مرحله خصوصیات دانه‌های سنگی، ملات قیری، خصوصیات مخلوط آسفالتی و خصوصیات سطح میکرو آنها می‌بایست مشخص گردد.

در مرحله سوم می‌بایست خصوصیات میکروسازه‌ای لایه‌ی روسازی مشخص گردد. محیط بتن آسفالتی محیطی پیوسته است که در مقیاس بینابینی شامل سه محیط دانه‌های سنگی، ملات قیری و فضای خالی است. بنابراین بتن آسفالتی می‌بایست به صورت سه محیط مستقل در مقیاس بینابینی پیکر بندی شده و مورد بررسی قرار گیرد [۱۵].

۳- تحلیل عـددی روسـازی انعطـاف پـذیر راه به روش میکرو سازه ای

پژوهش حاضر به دنبال تبیین تاثیرات مدلسازی میکروسازه‌ای رویه بر عملکرد روسازی و نحوه‌ی توزیع تنش و کرنش در لایه‌های روسازی می‌باشد. به دلیل اهمیت فصل مشترک لایه‌ها در انتقال نیرو و جابجایی، تمرکز بر روی این قسمت صورت گرفت. مدل مورد بررسی در حالت دو بعدی و به صورت چند لایه ای مطرح



شکل ۲ - نمایش ارتباط سطوح با مقیاس های مختلف برای تحلیل مواد مرکب

گردیده است. در ابتدا می‌بایست مدل تحلیلی از روی مدل هندسی مسئله تهیه گردد. این مرحله در روش میکروسازه ای اهمیت فراوانی دارد. در این مرحله از رویکرد جدیدی در تولید نمونه های تحلیلی استفاده گردید.

پس از تولید نمونه ها توسط نرم افزار MATLAB[1] و انجام مراحل پیش پردازش در محیط Abaqus[2]، نیرو ها به مدل اعمال می‌گردد. این قسمت مرحله‌ی پردازش بوده که توسط نرم افزار Abaqus انجام شده است. در قسمت

[1] MATLAB v-7.11.1
[2] Abaqus v-6.10

پس پردازش، رفتار روسازی از چگونگی عکس العمل آن نسبت به تنش‌ها و کرنش‌ها قابل تفسیر می باشد. در این مرحله نحوه‌ی انتشار تنش و کرنش، شکل جریان آنها، و نقاط بحرانی مورد توجه قرار می‌گیرند. از طرف دیگر چون مدل راه به صورت چند لایه مطرح می‌گردد، اندرکنش های فصل مشترک، سهم لایه ها از توزیع تنش و کرنش و نحوه‌ی انتشار تنش و کرنش بین لایه‌ها، نیز در بررسی‌ها ملاک عمل قرار می‌گیرد.

۳- ۱- تولید نمونه‌ها

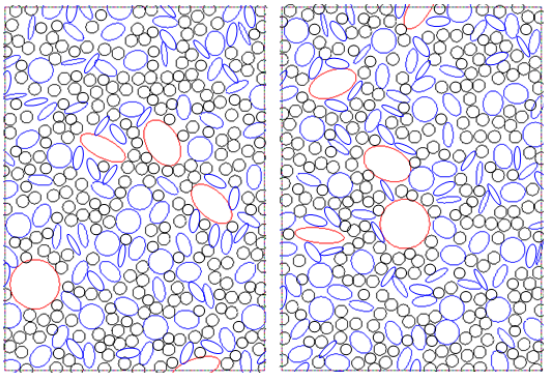
اولین قدم در انجام این پژوهش، تولید نمونه‌ها بر پایه‌ی اصول میکروسازه‌ای می‌باشد. در روش‌هایی که برای تولید مدل هندسی ارایه گردیده است، محدودیت‌هایی وجود دارد. یکی از این محدودیت‌ها شکل همگون و چیدمان منظم دانه هاست. چنین فرضی در مورد رویه‌ی راه، مدل تحلیلی را بسیار ساده می‌نماید. همانگونه که اشاره شد، در برخی از تحقیقات طراحی مصالح سنگی و جانمایی آن ها در نمونه‌ی تحلیلی به صورت دستی و سلیقه‌ای انجام شده است. این فرض نیز پایه‌ی علمی سستی داشته و مدل تحلیلی، از اعتبار علمی لازم برخوردار نخواهد بود. به دلیل اینکه خصوصیات مصالح سنگی در راهسازی مشخص می باشد، بنابراین نمی توان از این روش استفاده نمود. در روش استفاده از مقاطع اسکن شده که به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای تولید و جانمایی مصالح سنگی در مقطع تحلیلی مطرح می‌باشد، نیز محدودیت هایی وجود دارد. چرا که تعداد نمونه‌ها محدود به تعداد برداشت میدانی می‌باشد. از آنجایی که برای تولید نمونه‌های تحلیلی می‌بایست از مقطع نمونه‌های مذکور اسکن انجام گیرد، در نتیجه تعداد اندکی مقطع متمایز به عنوان نمونه‌ی تحلیلی قابل استفاده می‌باشد. این موضوع باعث می‌گردد که تحلیل میکروسازه‌ای دچار محدودیت شود. با توجه به چنین کاستی هایی در مدلسازی، تحقیق و بررسی‌های فراوانی در پژوهش حاضر صورت گرفت. ماحصل بررسی‌ها منجر به استفاده از رویکرد آماری شد.

این روش که "تولید و جانمایی مصالح روسازی به کمک توزیع‌های آماری" نام گذاری شده، نسبت به روش اسکن مقاطع واقعی دارای دو مزیت می‌باشد:

الف- رفع محدودیت تعداد نمونه‌ها: همانگونه که بیان شد، تعداد نمونه‌های مورد تحلیل در روش مقاطع اسکن شده، وابسته به تعداد نمونه‌های برداشت شده است.

ب- کسب توانایی پیش بینی خصوصیات موثر و رفتار بدنه راه به کمک مشخصات فنی مصالح و ترافیک طرح، قبل از اجرای راه، روش مقاطع اسکن شده در زمان اجرای روسازی قابل انجام بوده و پیش از اجرا امکان بررسی نمی‌باشد.

در روش تولید و جانمایی مصالح روسازی به کمک توزیع-های آماری، می توان از انواع توزیع‌های آماری پیوسته استفاده نمود. نوع توزیع آماری مورد استفاده بر اساس شرایط و فرضیات مدلسازی، تعیین می‌گردد. در این پژوهش چند نمونه به کمک توزیع‌های آماری منتخب و براساس فرضیات مدلسازی تولید شدند. سپس با بررسی نمونه‌های تولیدی و مقایسه‌ی آنها نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به مقطع برداشت شده‌ی از رویه راه، توزیع نرمال به عنوان توزیع مناسب تایید شد و نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از توزیع نرمال تولید گردید (شکل۳).

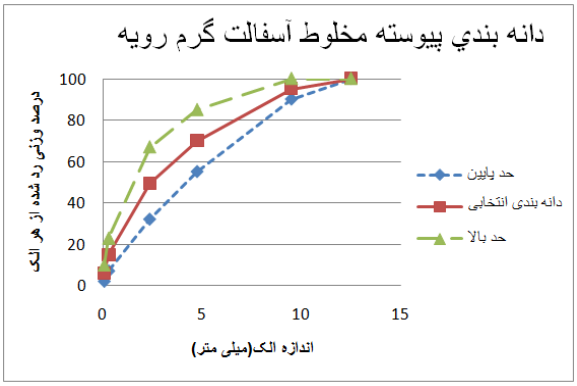


شکل۳ - نمونه های تولید شده به کمک توزیع های آماری

نتایج تحقیق نشان داده است که توزیع یکنواخت و در شرایط خاص توزیع بتا قابلیت تولید و جانمایی دانه‌ها را دارا می‌باشند. در تولید و جانمایی مصالح رویه راه به گونه‌ای عمل شده که خصوصیات رفتاری رویه راه به

خوبی ارایه شود و نتایج حاصل از آزمایش را به راحتی بتوان به مقیاس کلی تعمیم داد. برای این منظور می-بایست خصوصیات مصالح و درصد وزنی هر یک از مصالح در رویه راه مشخص گردد.

مصالح سنگی با توجه به شکل ۴ از دانه بندی منحنی میانگین پیروی می‌کند. مصالح سنگی همگی از یک قرضه بدست آمده و مشخصات مهندسی همه‌ی آنها مشابه هم می‌باشد. هر نمونه با سه بخش مصالح سنگی، ملات قیری و محدوده‌ی مرزی مصالح سنگی و ملات قیری تعریف شده است. در تولید مصالح سنگی، درصد فضای خالی مصالح سنگی برای فضای خالی آسفالت برابر با ۴ درصد، در نظر گرفته شده است [۱۶]. تحلیل مقاطع در محیط المان محدود و تحت شرایط میکروسازه‌ای انجام گردیده است.

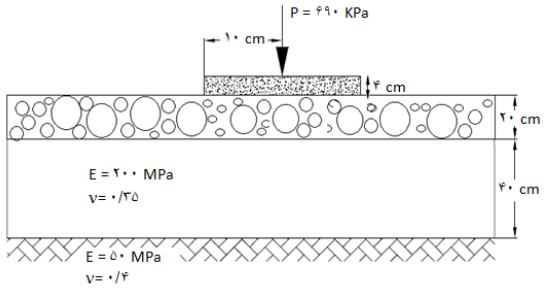


شکل ۴- نمودار دانه بندی مخلوط آسفالتی با دانه بندی پیوسته [۱۶]

مصالح دانه‌ای کوچکتر از قطر ۲ میلیمتر، به عنوان قسمتی از ملات قیری در نظر گرفته شده است. ملات قیری، قیر ۶۰-۷۰ می‌باشد که در شرایط معمول، از آن استفاده می‌گردد. محیط ملات قیری، محیطی همگن فرض گردیده است. درنهایت با استفاده از فرضیات مذکور و توزیع نرمال و به کمک نرم افزار MATLAB نمونه‌ها تولید گردید.

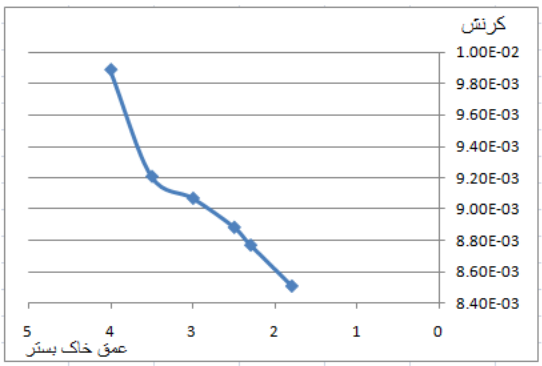
۳-۲- طراحی عمق لایه بستر

در بررسی عملکرد جسم راه، مدلی مطابق شکل ۵ تحت اثر بار چرخ در نظر گرفته شد. در مدلسازی جسم راه، معمولا عمق لایه خاک بستر به طول ۲ الی ۴ متر در نظر گرفته می‌شود. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که تغییرات عمق خاک در نتایج تاثیرگذار می‌باشد. به منظور دستیابی به طول مناسب برای لایه بستر خاک، با حداکثر طول پیشنهادی خاک بستر، تحلیل آغاز گردید.



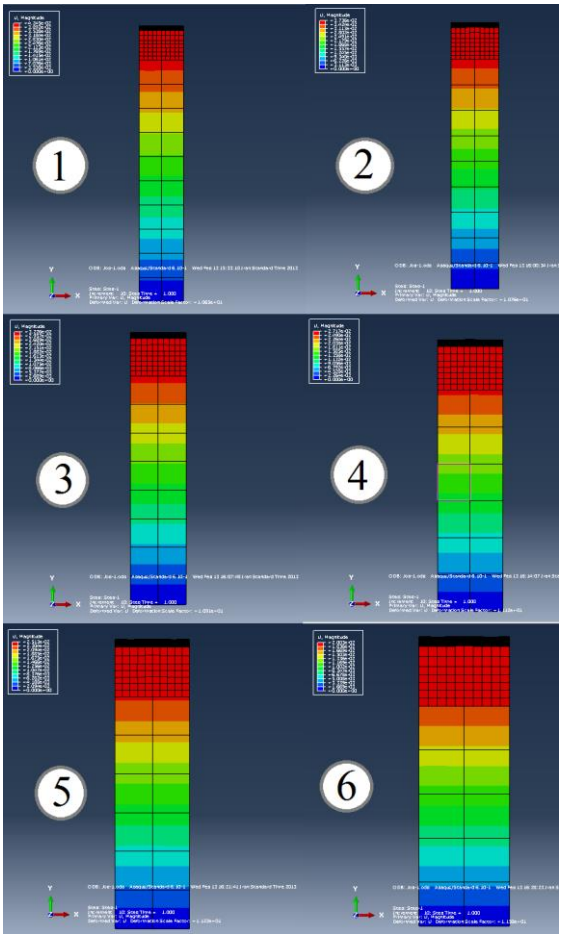
شکل۵ - مقطع روسازی مورد تحلیل

با انجام تحلیل با فرض عمق لایه بستر به طول ۴ متر، فاصله‌ی ۰/۵ متر انتهای نمونه تحت کرنش قرار نمی‌گیرد (شکل ۷ -۱). بنابراین تحلیل با عمق خاک بستر کمتر، یعنی حذف منطقه‌ی خنثی، ادامه یافت. این روند کاهش عمق خاک بستر تا عمق ۱/۸ متری ادامه پیدا کرد. با کاهش میزان عمق خاک بستر، میزان کرنش کاهش یافت. تغییرات کرنش نسبت به عمق خاک بستر در نمودار شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل۶ - تغییرات کرنش نسبت به عمق خاک بستر

با توجه به نمودار در این مدل، افزایش عمق خاک بستر از حدود ۳ متر، باعث کاهش غیر خطی در میزان کرنش شد. این بدین معناست که خاک بستر در عمق بیش از ۳ متر تغییرات غیر خطی در استهلاک انرژی نشان می‌دهد. بنابراین استفاده از عمق بیش از ۳ متر در این تحلیل توصیه نمی‌گردد.



شکل۷ –منحنی‌های میزان جابجایی در ارتباط با میزان عمق خاک بستر

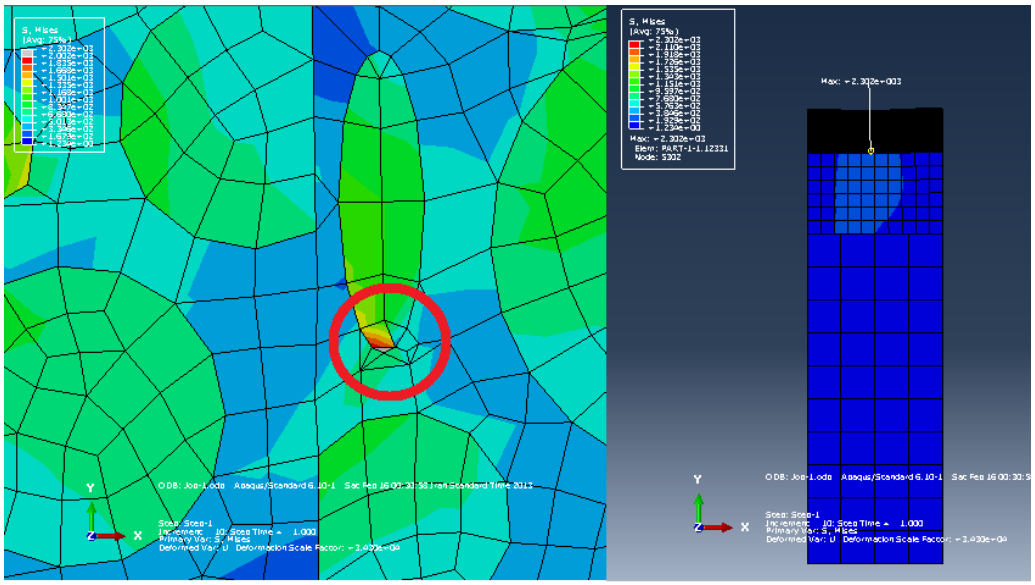
در ازای عمق ۱/۸ متری از خاک بستر(شکل۷ -۶)، تقریباً بدنه راه در حالت کرنش مستقل از خاک بستر عمل می-نماید و به عنوان نقطه‌ی واگرایی مدل لحاظ می‌شود.

موضوع دیگری که از حیث طراحی مطرح می‌شود، محل تنش کششی ماکزیمم در زیر لایه آسفالت می‌باشد. همانگونه که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود، حداکثر تنش در زیر مرکز بار و در نزدیکی فصل مشترک رویه با لایه زیرین خود اتفاق افتاده است. با توجه به نتایج مدلسازی، در اکثر موارد، تمرکز تنش و نقاط بحرانی، به خاطر وجود دانه های شکسته می‌باشد (شکل ۸ ب).

بر این اساس در تعیین نقاط بیشینه‌ی تنش می‌بایست به جانمایی محل وقوع تنش بیشینه توجه نمود و در صورتی که به صورت نقطه‌ای درگیر شود، می‌بایست از بررسی نتایج حذف شود.

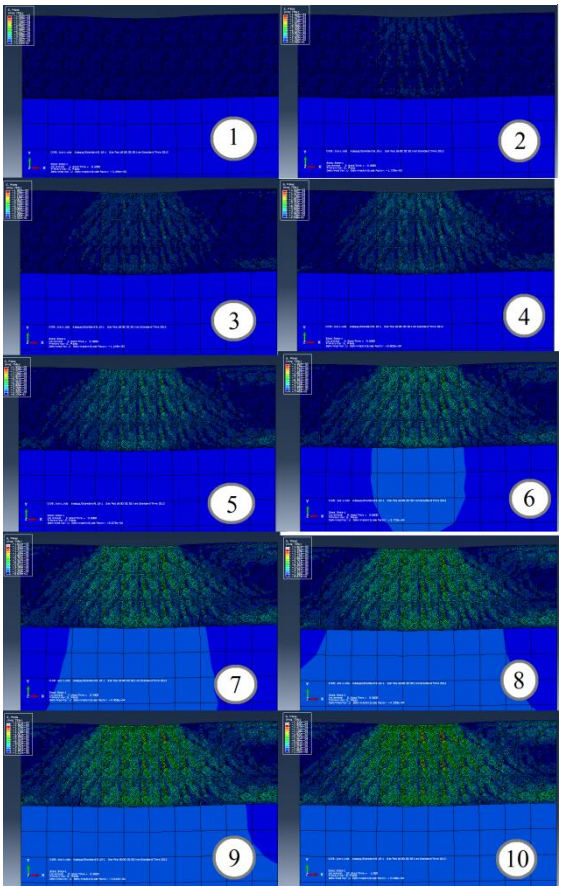
۳ -۳- مقایسه پاسخها با توجه به اصطکاک فصل مشترک لایه‌ها

تحلیل در دو حالت انجام شد. در حالت اول فصل مشترک ها با اصطکاک کامل فرض شدند و در حالت دوم کلیه فصل مشترک‌ها بدون اصطکاک در نظرگرفته شدند (شکل۹ و شکل۱۰). از نظر شکل جریان، هر دو نمونه تا مرحله ۴ رفتاری مشابه دارند. تفاوت‌ها در مرحله‌های ۵ به بعد در چند جنبه قابل بررسی می‌باشند. همانگونه که در مرحله ۵ دیده می‌شود، نمونه‌ی بدون اصطکاک، تنش‌های دریافتی را در رویه حفظ نموده و با انتقال آن به شعاع‌های دورتر سعی در انتشار آن دارد. نتیجه این موضوع افزایش فشار در شعاع‌های دورتر از محل اثر نیرو و انتقال کمتر نیرو به اعماق می باشد. نمونه‌ی دارای اصطکاک، با انتقال تنش به لایه‌های زیرین سعی بر انتشار تنش می‌نماید. نتیجه این موضوع، کاهش تنش در لایه رویه و انتقال آن به سطوح زیرین خاک می‌باشد. به دلیل ماهیت متفاوت انتقال تنش، تنش در حین انتقال بین لایه‌ای در حالت بدون اصطکاک در محدوده‌ی کوچکتر و با عمق بیشتر رخ می‌دهد. اما در حالت دارای اصطکاک، تنش در حین انتقال محدوده‌ی بیشتری از لایه زیرین را تحت تاثیر قرار داده و عمق نفوذ تنش کاهش می‌یابد.

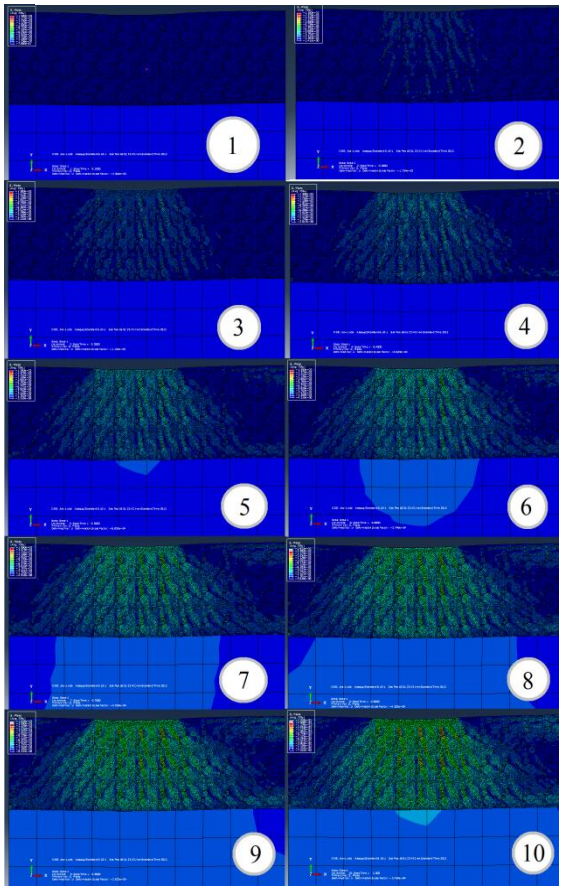


ب الف

شکل۸ - الف- محل وقوع ماکزیمم تنش، ب- نمایشی از یک دانه شکسته که تسلیم در قسمت زیرین آن اتفاق افتاده است.



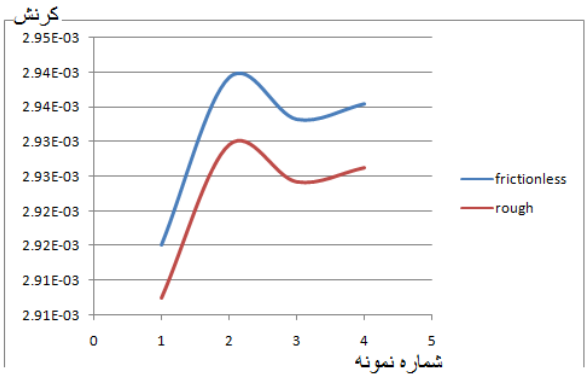
شکل ۹- جریان تنش در نمونه بدون اصطکاک



شکل ۱۰- جریان تنش در نمونه با فرض اصطکاک

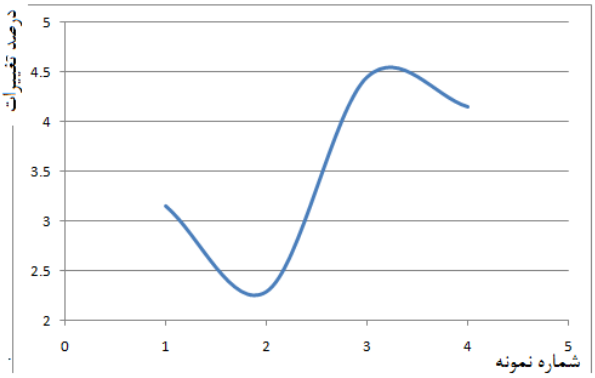
از نظر عددی، چهار نمونه مختلف در دو حالت اصطکاک کامل و بدون اصطکاک مورد تحلیل قرار گرفت. همانطور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد، کرنش نسبت به

اصطکاک فصل مشترک، حساسیت کمی دارد. از طرف دیگر نیز مقدار تغییرات، حالت خطی دارد. در نتیجه با داشتن مقدار عددی هر حالت می توان برآورد نسبتاً دقیقی از مقدار عددی حالت دیگر بدست آورد.



شکل ۱۱- مقدار عددی کرنش برای چهار نمونه تحت حالت های اصطکاک و بدون اصطکاک

تنش در حالت بدون اصطکاک بیشتر از حالت اصطکاک کامل می‌باشد. میزان اختلاف ایجاد شده در دو حالت مقدار ثابتی نیست. اما دارای رواداری محدودی می‌باشد. در شکل ۱۲ منحنی ارائه شده اختلاف درصد تغییرات تنش را بین دو حالت بدون اصطکاک و دارای اصطکاک نشان می‌دهد. همانطور که در منحنی نشان داده شده است، محدوده این تغییرات بین دو تا پنج درصد می‌باشد.



شکل ۱۲- منحنی اختلاف درصد تغییرات تنش بین دو حالت بدون اصطکاک و دارای اصطکاک برای چهار نمونه

۴- نتیجه گیری

با مقایسه نحوه‌ی توزیع تنش و کرنش، می‌توان تفاوت انتشار این دو جریان را مشخص کرد. انتشار تنش مشابه ذوزنقه می‌باشد. اما توزیع کرنش به شکل کروی و در بینهایت فیزیکی به صورت لایه‌های موازی می‌باشند.

در برخی از مدلسازی‌ها خاک بستر نیز وارد جریان مدلسازی می‌شود. معمولاً خاک بستر به اندازه ۲ الی ۴ متر در نظر گرفته می‌شود. با بررسی نتایج این مطالعه در مدلسازی خاک بستر، پیشنهاد می‌شود محدوده مدلسازی خاک بستر به عمق ۲ متر و با رواداری نیم متر باشد.

از طرف دیگر با تمرکز بر نتایج در سطح میکروسازه مشخص گردید که بعضی از نواحی کوچک نقاط روسازی ممکن است به محدوده‌ی بحرانی تنش و یا کرنش برسند. این نقاط اصولاً به دلیل آرایش خاص مصالح دچار تمرکز تنش می‌شوند و تاثیر چندانی بر عملکرد کلی رویه، نمی-گذارند. به همین خاطر می‌بایست در فرایند تحلیل نسبت به نتایج این نقاط دقت نمود.

در انتها، نحوه‌ی اثر اصطکاک فصل مشترک لایه‌ها بر پاسخ‌های بدست آمده مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که کرنش نسبت به اصطکاک فصل مشترک، حساسیت کمی دارد. از طرف دیگر نیز مقدار تغییرات کرنش تقریبا ثابت است. در نتیجه با داشتن مقدار عددی هر حالت می‌توان برآورد نسبتاً دقیقی از مقدار عددی حالت دیگر بدست آورد. در مورد تنش، میزان اختلاف ایجاد شده در دو حالت مقدار ثابتی نیست. اما در یک رواداری محدود تغییرات دارد. اختلاف درصد تغییرات تنش در دو حالت بدون اصطکاک و دارای اصطکاک در محدوده‌ی دو تا پنج درصد متغیر است.

۵- مراجع

[1] Dai, Q. (2011), “Three-Dimensional Micromechanical Finite-Element Network Model for Elastic Damage Behavior of Idealized Stone-Based Composite Materials”. Journal of Engineering Mechanics, Volume 137(6), pp 410–421.

[2] Sadd, M. H, Dai, Q, Parameswaran, V, Shukla, A. (2007), "Simulation of Asphalt Materials Using Finite Element Micromechanical Model with Damage Mechanics". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Volume 1832, pp 86-95

[3] Yin, H.M. , Buttlar, W.G. (2008). "Assessment of Existing Micro-mechanical Models for Asphalt Mastics Considering Viscoelastic Effects". Road Materials and Pavement Design. Volume 9, pp. 31-57

[4] Gardner, J. P. (1994), "Micromechanical modeling of composite materials in finite element analysis using an embedded cell approach" Massachusetts Institute of Technology

[5] You, Zh., Tomasini, D. , Tomasini ,R.A.(2006), "Three-Dimensional Discrete Element Models for Asphalt Mixtures". Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University

[6] You, Zh., Dai, Q.(2007), "Prediction of Creep Stiffness of Asphalt Mixture with Micromechanical Finite-Element and Discrete-Element Models". Journal of Engineering Mechanics, Volume 133(2), pp 163–173.

[7] Cui, Y., Xing, Y., Ni, W. (2013), "Micromechanical characteristics of the asphalt mixture in bending condition". Science China Technological Sciences, Volume 56, Issue 2, pp 392-397.

[8] Coleria,E., Harveya, J.T., Yangb, K., Booneb, J. M. (2013)," Micromechanical investigation of open-graded asphalt friction courses' rutting mechanisms". Construction and Building Materials, Volume 44, Pages 25–34.

[9] Zelelew,H. , Mahmoud,E., Papagiannakis , A. T. (2013), "Micromechanical Simulation of the Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures".Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials , Volume 8, pp 421-432.

[10] Masad, E., Tashman, L., Somedavan, N., Little, D. (2002), "Micromechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures". Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 14(5), pp 374–383.

[11] Shi, Q. (2003) , "A micromechanical strain gradient theory for instability problems in granular materials". Electronic Doctoral Dissertations for UMass Amherst, Paper AAI3110553.

[12] Masad, S. A. (2005)," Sensitivity analysis of flexible pavement response and AASHTO 2002 design guide for properties of unbound layers, Master's thesis". Texas A&M University.

[۱۳] فیروزآبادی ، ر.، حدیدی،ح. ، مهدی پور، الف. (۱۳۹۰)، "آنالیز حساسیت عکس العمل های روسازی با استفاده از مدل سازی غیرخطی". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران ، ۶ و ۷ اردیبهشت.

[۱۴] عامری، م. ، ملکوتی، م. (۱۳۸۲)، "تاثیر مشخصات فنی لایه اساس بر روی تنش های ناشی از انقباض بتن در روسازی های بتنی". فصلنامه جاده، شماره ۴۸، ص. ۱۸-۳۰.

[15] Wang L. (2010), "Mechanics of Asphalt Microstructure and Micromechanics". McGraw-Hill Companies.

[۱۶] معاونت امور فنی دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی (۱۳۸۲)، مشخصات فنی عمومی راه (تجدید نظر اول). سازمان مدیریت و برنامه ریز ی کشور، چاپ اول.