

کاربرد روش المان مجزا در تحلیل روسازی‌ها

بهروز ثقفی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و تراپری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران*

ابوالفضل حسنی، دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران**

*تلفن: ۰۹۱۲-۶۷۸-۵۴۶۸، پست الکترونیکی: b_saghafi@modares.ac.ir

**تلفن: ۰۸۸۰۱۱۰۰-۵۰۴۰، نامبر: ۰۸۸۰۵۰۴۰، پست الکترونیکی: hassani@modares.ac.ir

چکیده:

با توجه به ارزش راه‌ها و نقش کلیدی روسازی راه، مهندسین همواره به دنبال روش‌هایی بودند تا تصویر واقع‌بینانه‌تری از عکس العمل روسازی را تحت تأثیر عوامل مختلف بدست آورند. در این راستا، به روش‌های تجربی و آزمایشگاهی متفاوتی متولّ شدند که در نوع و زمان خود ارزش قابل ملاحظه‌ای داشتند. با افزایش سرعت، شدت و میزان بار ترافیکی، پسر شاهد اثرات منفی خرابی روسازی‌ها روی تعاملات اقتصادی، اجتماعی و نظامی بوده است. لذا محققین پس از مدت‌ها تحقیق و مطالعه، روش‌های تحلیلی مدرن را بدست آوردن تا به کمک آنها، در عین صرفظیر از بعضی عوامل مؤثر، دید مناسبی را جهت طراحی روسازی در اختیار بگیرند. پس از ظهور کامپیوتر و گسترش آن در جامعه، روش‌های تحلیل عددی که زاییده تفکر انتزاعی ریاضی‌دانان بودند، وارد میدان شده و توانایی‌های خود را در رفع نقاچیص روش‌های مدرن و تحلیل مسائل فیزیکی با دقت بالا به اثبات رساندند. در میان روش‌های عددی موجود، روش المان محدود و روش المان مجزا تطابق خاصی با خصوصیات روسازی‌ها داشته و توансنتن نظر مهندسین را جلب کنند. روش المان محدود نسبت به روش المان مجزا توان محاسباتی کمتری را می‌طلبد؛ در مقابل برای یک سری مسائل خاص مانند تحلیل روسازی‌های بلوکی بتی، تحلیل روسازی‌های دارای ترک‌های متعدد، بررسی رفتار ذرات دانه‌ای مصالح و در کل در شرایط محیطی ناپیوسته، دقت مورد انتظار را ارائه نمی‌دهد. در چنین مواردی دقت روش المان مجزا به مرتب بیشتر از روش المان محدود بوده و جواب‌هایی با دقت کافی بدست می‌دهد. از این رو، در این مقاله به کاربرد روش المان مجزا برای استفاده کاربران در تحلیل روسازی‌ها پرداخته شده است.

کلید واژه: روش المان مجزا، روش المان محدود، تحلیل روسازی.

۱- مقدمه

با افزایش استفاده انسان‌ها از راه‌ها و مشخص شدن ارزش‌های اقتصادی، اجتماعی و نظامی آنها و نیاز به سرعت عبور و مرور و همچنین اینمنی مناسب از یک طرف وجود خرابی‌های مدام و زودرس و اثرات منفی آنها

در کاهش سرعت و ایمنی، مجریان راه به فکر استفاده از روش‌های منطقی‌تر برای طراحی روسازی‌ها افتادند. در این راستا محققین آزمایشاتی را ترتیب دادند که در نهایت منجر به ارائه یک سری روش‌های تجربی و آزمایشگاهی شدند. اما امروزه مهندسین در گیر مسائلی هستند که هیچ تجربه قبلی در مورد آنها وجود ندارد. از این گذشته، تعلیم و آموزش تجربه‌های گذشتگان امری است دشوار و معمولاً اساس کار مهندسین عمران در هر زمان عبارت است از برخورد با یک موقعیت جدید [۱]. از این رو روش‌های مدرن ابداع گردیدند که عموماً براساس عکس العمل روسازی نسبت به بار خارجی تنظیم شده‌اند. در روش‌های مدرن، بیان ریاضی روش الاستیک خطی برای سیستم تک لایه‌ای در کنار و همراه با چندین مدل جدید از عکس العمل روسازی برای سیستم‌های چند لایه‌ای بکار می‌رود. قسمتی از بیان سیستم مدل‌سازی جدید مربوط می‌شود به پوشاندن اختلاف ما بین پاسخ‌های برداشت شده از روسازی در آزمایشگاه یا محل و عکس العمل‌هایی که معادلات و روابط ریاضی به ما می‌دهند [۲].

آگاهی از میزان تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییرشکل‌ها به هنگام اعمال مجموعه‌ای از بارهای تکراری مختلف ناشی از تغییرات درجه حرارت، نیروهای دینامیکی و غیره، علاوه بر اثر نیروهای خارجی، امری است که کیفیت طراحی را ارتقاء می‌دهد. در این راستا و در طول چند دهه اخیر، مهندسین به استفاده از روش‌های عددی روی آورده‌اند. این روش‌ها به دلیل پیشرفت‌های سریع در فن آوری رایانه و نیز به دلیل در دسترس بودن آنها برای مهندسین مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. دو روش عددی المان محدود^۱ و المان مجزا^۲ بیشتر مورد توجه طراحان روسازی قرار گرفته‌اند. در این مقاله به معرفی روش المان مجزا و کاربردهای آن در زمینه مسائل روسازی می‌پردازیم.

۲- تاریخچه تحلیل روسازی‌ها

با آغاز سال ۱۹۱۰، ورود حمل و نقل موتوری به سیستم حمل و نقل به صورت جدی آغاز شد و در نتیجه روسازی‌های ساخته شده از سنگ ماکadam که دائماً به علت نگهداری ضعیف، توسط آب اشباع می‌شدند، برای راه‌های بین شهری پاسخگو نبوده و باید بلافاصله نوسازی می‌شدند. در نتیجه هزینه تعمیر و نگهداری این راه‌ها به شدت افزایش یافت و مسئولان محلی نمی‌توانستند هزینه‌های تعمیر و نگهداری آنها را بپردازنند [۳]. لذا مسئولین ممالک تصمیم گرفتند تا به طریقی عمر و دوام روسازی‌ها را افزایش دهند و به روش‌های تجربی روی آوردن. در اوایل قرن بیستم، اولین روش‌های تجربی طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر تدوین گردیدند. برخی از آنها بر مبنای CBR خاک بستر ضخامت روسازی را تعیین می‌کردند. برمیستر^۳ (۱۹۴۵ و ۱۹۴۴) اولین معادلات را، ابتدا برای سیستم دو لایه‌ای و سپس برای سیستم سه لایه‌ای بدست آورد، معادلاتی که برمیستر بدست آورد، باعث پیشرفت چشم‌گیری در آنالیز روسازی‌ها به روش مکانیستیک شد [۲]. در سال ۱۹۵۰، دو روش، یکی بر اساس تغییرشکل محدود روسازی توسط مسئولین بزرگراه‌های ایالت کانزاس، و دیگری بر اساس معیار شکست برشی محدود، توسط باربر^۴ و سپس مک‌لئود^۵ تنظیم شدند [۴]. اولین منحنی‌های طراحی، در سال ۱۹۶۰، در مجموعه 29 Road Note

¹ Finite Element Method

² Distinct Element Method

³ Burmister

⁴ Barber

⁵ McLeod

جهت ارائه یک راهنمای طراحی سازه‌ای روسازی تحت بار ترافیکی، مصالح و شرایط آب و هوایی انگلستان چاپ و منتشر گردیدند [۵].

پیشرفت قابل توجه بعدی در سال ۱۹۶۲ رخ داد. شیفمن^۱ روش تحلیلی خود را که مشتمل بر استخراج تنش و تغییر مکان در یک سیستم الاستیک چند لایه‌ای بود، عرضه کرد [۲]. همزمان با او، کامپیوترهای الکترونیکی وارد بازار شدند و بدین ترتیب مشکل محاسبات سنگین این روش حل شد. در نتیجه طولی نکشید که روش شیفمن در مهندسی روسازی نقش بسیار برجسته‌ای را به عهده گرفت. این روش که بر قواعد و معادلات حاکم بر مکانیک محیط‌های پیوسته استوار بود، در میان مهندسین روسازی، مشهور بود به روش مکانیستیک که امروزه آن را روش تحلیلی می‌خوانند. برنامه کامپیوتری CHEVRON توسط میچلو^۲ در سال ۱۹۶۳ و برنامه BISTRO توسط پئوتز^۳ در سال ۱۹۶۷، بر اساس نتایج شیفمن، طراحی شدند. این دو نرم‌افزار تنش، کرنش و تغییر مکان را در هر نقطه از سازه چند لایه‌ای روسازی محاسبه می‌کردند. نرم افزار BISTRO توسط دی جونگ^۴ و همکارانش در سال ۱۹۷۳ کامل‌تر شد و BISAR نام گرفت [۲].

با عمومیت یافتن روش‌های عددی در دهه ۱۹۶۰، مهندسی روسازی نیز از این روش‌ها بهره جست. دونکن^۵، در سال ۱۹۶۸، اولین بار از روش المان محدود برای تحلیل روسازی‌های انعطاف‌پذیر استفاده کرد و بعدها برنامه‌های کامپیوتری زیادی بر اساس آن تهیه شدند. با به روی کار آمدن کامپیوترهای سریع، استفاده از روش المان محدود برای محاسبه تنش، کرنش و تغییر شکل به یک امر معمول تبدیل شد [۴]. کندال^۶ (۱۹۷۸)، یکی از محققین دانشگاه صنعتی دانمارک، برای بکارگیری روش المان مجزا در تحلیل روسازی‌ها، برنامه رایانه‌ای به نام BALL طراحی کرد [۲]. امروزه، استفاده از روش‌های عددی در مهندسی روسازی گسترش چشم‌گیری داشته و نرم‌افزارهای اختصاصی متعددی جهت طراحی روسازی‌ها، بر اساس روش‌های عددی، ارائه شد. برای اطلاعات بیشتر در زمینه نرم‌افزارها به مرجع [۲] رجوع کنید.

۳- اهمیت تحلیل روسازی‌ها

روسازی‌ها باید چنان طراحی شوند که مقاومت و سختی کافی داشته باشند تا بتوانند بارهای ترافیکی را به گونه‌ای پخش کنند که نه مصالح بستر و نه هیچ یک از لایه‌های روسازی دچار تنش بیش از میزان قابل تحمل آن نشوند. بنابراین، در طراحی روسازی‌های جدید مهم‌ترین پارامترهای مؤثر عبارتند از مقاومت خاک بستر، بار و شدت ترافیک پیش‌بینی شده و سختی مصالح در دسترسی که لایه‌های مختلف روسازی را تشکیل می‌دهند. روشنی که برای طراحی روسازی اتخاذ می‌شود باید تناسب کامل با محیط اجرای روسازی داشته باشد [۶]. از آنجایی که در ابتدا روش‌های تحلیل و طراحی مکانیستیک موجود نبودند، از روش‌های تجربی برای طراحی روسازی‌ها استفاده

¹ Scsiffman

² Michelow

³ Peutz

⁴ De Jong

⁵ Duncan

⁶ Cundall

می شد. در روش های تجربی پارامترهای مؤثر بر روسازی مانند دما، شدت و بار ترافیکی، خاک بستر و ... بسته به محیط اجرای روسازی، در طی انجام آزمایشات ثابت در نظر گرفته شده و بنابراین نتایج بدست آمده فقط برای آن محیط با شرایط مفروض صادق بوده و استفاده از آن روش طراحی برای شرایط غیر مشابه خطاهای و خرابی های بعدی را به دنبال خواهد داشت [۶].

یکی دیگر از دلایلی که مهندسین را وادار کرد تا به فرآیند تحلیل روسازی روی آوردند، عبارت بود از مسئله نگهداری روسازی. در مسئله نگهداری روسازی، عموماً مسئولین راهها با بودجه کم و محدود با توجه به افزایش بار ترافیکی جاده ها روبرو هستند که برای بهینه کردن هزینه ها در جستجوی راه حل مهندسی هستند. تحلیل روسازی مهندسین را قادر می سازد تا شرایط موجود روسازی را با معیارهای قابل استناد مورد بررسی قرار داده، شرایط روسازی را برای آینده پیش بینی کرده و به بهینه سازی هزینه های نگهداری پردازند [۲].

یکی از خصوصیات ویژه روسازی های آسفالتی قابلیت آنها در جهت مقاوم سازی روسازی موجود، به هنگام مشاهده آغاز خرابی تحت بار ترافیکی می باشد. این نوع روسازی می تواند توسط اجرای لایه های روکش جدید روی روسازی موجود و یا با جایگزین نمودن یک یا چند لایه از روسازی سابق با مصالح آسفالتی جدید تقویت شود. اغلب ارزیابی مقاومت با قیمانده روسازی قدیمی و بالنتیجه تخمین مقاومت اضافی مورد نیاز کار مشکل و هزینه بری است. در صورتی که بتوانیم به تحلیل روسازی پردازیم، قادر خواهیم بود از این قابلیت روسازی آسفالتی در جهت ارتقاء کیفی آن استفاده کنیم [۶].

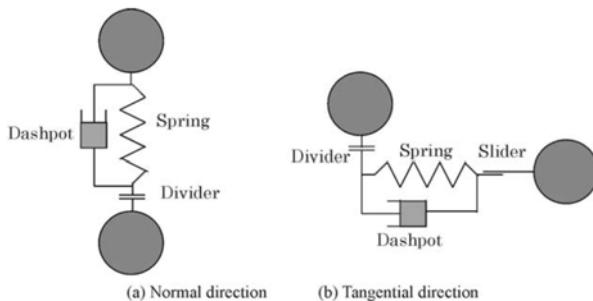
۴- روش المان مجزا

در این روش توده جسم به صورت یک محیط ناپیوسته فرض می شود؛ بنابراین، تأثیر عوارض ساختاری نظیر درزها، ترک ها، تغییر در جنس و نوع مصالح و انواع دیگر ناپیوستگی ها قابل بحث و بررسی است. وقتی بارگذاری در سطح المان (در این روش المان ها به صورت دیسک هستند) صورت می گیرد، تغییرات نیرو در سطوح همچوار در مقابل زمان شروع می شود و معادلات تعادل دینامیکی برای هر المان به صورت تکراری حل می گردد تا زمانی که قوانین موجود در سطح و شرایط مرزی مسئله ارضا شوند [۱].

در سطوح جدیدتر این روش، المان ها می توانند دارای هر شکل دلخواهی باشند؛ همچنین می توان دیسک ها را به صورت صلب و یا شکل پذیر در نظر گرفت. دیسک های صلب می توانند برای شبیه سازی محیط هایی که در آنها مصالح از مقاومت بالایی برخوردار بوده و بیشترین تأثیر در رفتار توده جسم و مدل از جانب ناپیوستگی های آنها می باشد و یا در محیط های با تنفس جزئی، مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از دیسک های شکل پذیر نیز برای مصالح با مقاومت کمتر که نقش کنترل ساختاری کمتر است، مفید می باشد [۱]. برای مثال هر دیسک صلب به صورت جداگانه و با توجه به جرم، ممان اینرسی و خصوصیات سطح تماس تعریف می شود. مجموعه فر و میراگرهای عمودی و مماسی^۱ نیز در هر سطح تماس گنجانده می شوند. نمونه ای از مدل تعریفی به همراه فنرها و میراگرهای در

^۱ Normal and tangential springs and dashpots

شکل (۱) نشان داده شده‌اند. اگر ذرات توده مورد تحلیل جدای از یکدیگر باشند، به یک جداکننده^۱ نیاز داریم تا مانع تماس دو دیسک با یکدیگر شود. بدین طریق قادر خواهیم بود نیروی برشی بین دو ذره را بیابیم [۷].



شکل (۱): مدل تماس دو دیسک صلب در روش المان مجزا [۷]

برای سطوح ناپیوستگی موجود نیز می‌توان از قبل معیار شکست مشخصی را در نظر گرفت. این قابلیت توان و انعطاف‌پذیری زیادی را به این روش بخشیده است. پارامترهایی که برای توصیف مصالح و ناپیوستگی‌های محیط بکار می‌روند، باید از دقت خوبی برخوردار باشند. علاوه بر این پارامترهای ویژه‌ای نظیر میرایی سیستم نیز باید تعیین شوند. دقت فراوان و درنظر گیری ناپیوستگی‌ها باعث شده است زمان انجام محاسبات افزایش یابند [۱].

۴-۱- اساس روش المان مجزا

فرضیات این روش بر مبنای تئوری بلوکی استوار است؛ یعنی توده جسم به عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا در نظر گرفته شده، تغییرشکل‌ها و رفتار مواد تشکیل‌دهنده داخل بلوک بسیار ناچیز فرض می‌شود. درزها و ترک‌های محیط نیز در نقش ناپیوستگی‌های بین بلوک‌ها بوده، یا به عنوان شرایط مرزی عمل می‌کنند یا به عنوان یک المان ویژه در مدل در نظر گرفته می‌شوند. در یک مجموعه تحت تنش، نیروها و جابجایی‌ها در مرز ناپیوستگی‌ها، به وسیله یک دسته عملیات محاسباتی بر اساس حرکات بلوک‌ها، محاسبه می‌شوند [۱].

در این روش برای ترک‌ها خصوصیات مکانیکی مشخصی تعریف شده و گسیختگی به صورت جابجایی بلوک‌ها روی هم و نه گسیختگی خود بلوک‌ها در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، این روش برای شرایطی مناسب است که جابجایی درزها و ترک‌ها، تغییرشکل بلوک را تحت الشعاع قرار می‌دهند [۱].

۴-۲- نقاط قوت و ضعف روش المان مجزا

دقت زیاد عاملی شده است تا این روش برای تحلیل کیفی تغییرشکل‌ها و شکست سازه‌ها بسیار مفید باشد و شناخت و درک ارزشمندی نسبت به مکانیزم شکست فراهم آورد. برخی از مزایای این روش را می‌توان به شکل زیر بر شمرد:

۱. ایجاد قابلیت بررسی سینماتیکی،

¹ Divider

۲. ارائه دقت فوق العاده در نتایج تحلیل،
۳. امکان مدل سازی ناپیوستگی هایی نظیر درزها، ترکها و تغییر جنس مصالح،
۴. توانایی فوق العاده این روش در مقایسه با سایر روش ها، برای بررسی تغییر شکل های بزرگ یا جابجایی در طول زمان [۱].

با وجود مزایای این روش، نقاط ضعفی نیز برای آن مترتب می باشد. این نقاط ضعف را بطور اختصار می توان به صورت زیر برشمرد:

۱. در انتخاب پارامترهای لازم برای توصیف رفتار مواد باید دقت زیادی اعمال گردد؛ نیز پارامترهای دیگری مثل میرایی سیستم باید در نظر گرفته شوند.
۲. زمان محاسباتی لازم برای تجزیه و تحلیل ممکن است طولانی شود.
۳. اطلاعات مورد نیاز برای مدل سازی در این روش بسیار گسترده است. بنابراین اطلاعات کاملی از ویژگی های ناپیوستگی های منطقه مورد نیاز است که این امر همیشه به سادگی مقدور نمی باشد [۱].

۵- روش المان مجزا برای تحلیل روسازی ها

برنامه هایی که بر اساس معادلات سیستم الاستیک دو لایه ای برمیسترن تو دین شده بودند، تنش ها و کرنش ها را محاسبه کرده، در نهایت با معیارهای گسیختگی تعریف شده مقایسه می کردند [۴]. در بیان کلاسیک نظریه الاستیک و تمام این برنامه ها فرض بر این بود که لایه های روسازی رفتار الاستیک خطی داشته [۴] و مصالح روسازی پیوسته، متجانس و همسانگرد می باشند [۲]. اما، در شرایط واقعی، فرض متجانس و الاستیک خطی بودن مصالح روسازی یک فرض غیر واقعی است. تقریباً اکثر قریب به اتفاق مصالح روسازی نامتجانس هستند. مصالح سنگدانه ای که شرایط ویژه ای از لحاظ تجانس داشته باشند، در طبیعت به حالت خاص یافت می شوند [۴]. این مسئله برای مصالح دانه ای حادتر است و در نظر گرفتن این فرض ها برای مصالح دانه ای مسئله ساز خواهد بود. چرا که این دسته از مصالح به مانند اجسام صلب تغییر شکل نمی دهند و میزان تغییر شکل آنها نتیجه میزان غلتش یا لغزش آنها بر روی یکدیگر است [۲]. با توجه به ماهیت مصالح مخلوط های آسفالتی تغییرات در تهیه آنها تأثیر زیادی در رفتار نهایی می گذارد که قابل اغماس نیست؛ از این رو، مخلوط بدست آمده مخلوط متجانسی نخواهد بود. در نتیجه مصالح روسازی ها رفتار الاستیک خطی نداشتند، وقتی تحت تنش قرار می گیرند، تغییر شکل های الاستیک، ویسکوز، پلاستیک یا ویسکوالاستیک از خود نشان می دهند [۴]. از سوی دیگر، هر چند، روش الاستیک چند لایه ای به همراه بارگذاری استاتیکی راه حلی منطقی در مقابل روش های تجربی قدیمی به شمار می رود؛ شرایط واقعی بارگذاری به صورت تکراری و دینامیکی می باشد. استفاده از روش های عددی راه حل بهتری است که در کنار تحلیل روسازی تحت بارگذاری دینامیکی، امکان در نظر گیری شرایط غیر همگن، نامتجانس و غیر خطی سازه روسازی را نیز فراهم می کند [۸].

در طول دهه های گذشته تلاش های قابل ملاحظه ای در واضح تر کردن روش المان مجزا در عرصه تحقیق صورت گرفته است. برنامه ای که کندال (BALL) طراحی کرد، جابجایی قسمت های مجزا را در مقابل گذر زمان بر

اساس نیروهای اعمال شده به هر جزء محاسبه می‌کرد. از یک قانون نیرو- تغییر مکان نیز برای تعیین نیروی تماسی مابین اجزا استفاده می‌شود. از آنجایی که یک بار همه تغییر مکان‌ها محاسبه شده‌اند، در ادامه همان فرآیند با گذر زمان تکرار می‌شود [۲].

مزیت روش المان‌های مجزا، توانایی این روش در مدل‌سازی واقع‌بینانه مصالح روسازی با در نظر گرفتن توزیع ذرات دانه‌ای، اندازه دانه‌ها و زاویه شکستگی آنها، همچنین درجه تراکم، سختی، ضریب اصطکاک دانه‌ها و چسبندگی بین ذرات می‌باشد [۲]. به دلیل دارا بودن قابلیت ویژه در بررسی محیط‌های ناپیوسته، نتایج تحلیل روسازی‌های بلوکی بتنی با استفاده از این روش، تفاوت‌های چشم‌گیری با نتایج حاصل از بکارگیری روش المان محدود خواهد داشت. از مزیات دیگر این روش تعیین دو نوع عکس‌العمل، یعنی نیروهای بین ذرات و جابجایی آنها می‌باشد. همچنین این روش مانند اکثر روش‌ها مهندس را قادر می‌سازد تا کرنش آنی و الاستیک و کرنش دائمی (پلاستیک) را محاسبه کند. تعیین و محاسبه عکس‌العمل روسازی در این روش و نحوه عملکرد آن مانند سایر روش‌های عددی در مراحل جداگانه‌ای صورت می‌پذیرد [۲].

۶- نتیجه‌گیری

۱. از میان روش‌های مناسب با ساختار مهندسی عمران، روش‌های المان محدود و المان مجزا روش‌های مناسب‌تری برای تحلیل روسازی‌ها و تعیین عکس‌العمل‌های روسازی یعنی تنش، کرنش و تغییر‌شکل در مقابل عوامل تأثیرگذار نظیر سرعت، شدت و بار ترافیکی، گرادیان حرارتی، وجود فشار آب زیرزمینی و ... می‌باشند.
۲. در هر دو روش المان محدود و المان مجزا، امکان مدل‌سازی و تحلیل لایه‌های مختلف روسازی و همچنین امکان تعریف مصالح با خصوصیات متفاوت وجود دارد؛ اما روش المان مجزا تغییر در خصوصیات مصالح را بهتر و ساده‌تر مدل می‌کند.
۳. روش المان مجزا به علت ساختاری که دارد، برای حل مسائلی که در حیطه مکانیک محیط‌های ناپیوسته می‌گنجند، دقت بیشتری نسبت به روش المان محدود ارائه می‌کند؛ اما در عین حال حجم محاسباتی سنگین و زمان‌بری را به عهده رایانه می‌نهد. ناگفته نماند که کلاً هر دو روش از محاسبات نسبتاً سنگینی برخوردار هستند.
۴. در بررسی محیط‌های پیوسته‌ای که ناپیوستگی‌های جزیی و محدودی دارند، روش المان مجزا دقت بیشتری نسبت به روش المان محدود بدست می‌دهد؛ اما از آنجا که در این موارد عموماً روش المان محدود دقت قبل قبولی را در مقابل حجم محاسباتی کمتر ارائه می‌کند، اکثر مهندسین به استفاده از روش المان محدود علاقه نشان می‌دهند.
۵. برای تحلیل روسازی‌های بلوکی، تحلیل روسازی‌های با ترک‌های متعدد و فراوان، بررسی اثرات اندازه مصالح، زاویه شکستگی مصالح دانه‌ای، درجه تراکم ذرات و چسبندگی بین آنها و همچنین بررسی ضریب اصطکاک روسازی‌ها، روش المان مجزا روش قابل‌تری است. چراکه روش المان محدود برخلاف روش المان مجزا در تحلیل محیط‌های با ناپیوستگی مکرر و فراوان دقت مناسبی ندارد.

۷-مراجع

- 1- Jing, L. & Hudson, J.A., 2002, "**Numerical Methods in Rock Mechanics**", International Journal of Rock mechanics and Mining Science, Vol. 39, P.P. 409-427.
- 2- Hildebrand, George, 2002, "**Verification of Flexible Pavement Response from a Field Test**", Report 121 of Danish Road Institute, Denmark.
- 3- Croney, David & Croney, Paul, 1991, "**The Design and Performance of Road Pavements**", McGraw-Hill International Series in Civil Engineering, UK.
- 4- Hadi, Muhammad N.S. & Bodhinayake, B.C., 2003, "**Non-linear Finite Element Analysis of Flexible Pavements**", Advanced in Engineering Software No. 34, P.P. 657-662.
- 5- Road Note 29, 3rd ed., 1978, "**A guide to the structural design of pavements for new roads**", Road Research Laboratory, Department of environment, London, UK.
- 6- British Aggregate Construction Materials Industries (BACMI), 1985, "**What's in a road?**", ACMA Product Group, UK.
- 7- Jiang, M.J., Konard, J.M., Leroueil, S., 2003, "**An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies**", Computers and geotechnics No. 30, P.P. 579-597.
- 8- Khanal, P.P., Mamkouk, M.S., 1997, "**Program BIMODPAV for analysis of flexible pavements**", J Transport Engng, January/February Issue, P.P. 43-50.