

ارزیابی روش‌های مدلسازی مبتنی بر مکانیک شکست جهت تحلیل رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی

غلامعلی شفابخش، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
امین تناکلی‌زاده، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
پست الکترونیک نویسنده مسول: shafabakhsh@semnan.ac.ir
دریافت: ۹۳/۰۵/۳۰ - پذیرش: ۹۳/۱۱/۳۰

چکیده

با توجه به اهمیت خرابی‌های ناشی از ترک خوردگی روسازی‌های آسفالتی و ارتباط مستقیم آن با ویژگی‌های شکست مصالح آسفالتی، در این مقاله به بررسی و ارزیابی روش‌های مدلسازی سازوکار شکست مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است. روش‌های مدلسازی شامل مدل‌های ناحیه چسبنده، روش ناپیوستگی تعبیه شده (EDM)، روش المان مرزی ناپیوستگی تغییرمکان (DDM)، روش المان گسسته (DEM)، روش المان محدود توسعه یافته (XFEM) و تکنیک تطابق تصاویر دیجیتال جهت بررسی رفتار شکست و ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی شدند. در نهایت، روش مدلسازی دوگانه (شامل المان محدود و المان مرزی) همراه با کاربرد پردازش تصاویر جهت تعیین ریزساختارها، برای بررسی خواص شکست مخلوط‌های راجع در کشور توصیه شدند.

واژه‌های کلیدی: ترک خوردگی، مکانیک شکست، مدل ناحیه چسبنده، روش المان محدود، روش المان مرزی

۱- مقدمه

آسفالتی از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا شناسایی مسیرهای رشد ترک باعث یاری به مهندسان طراح جهت طرح روکش مناسب و یا در نظر گرفتن سیستم مقاوم در برابر رشد ترک می‌شود. در این مطالعه سعی بر مرور و ارزیابی روش‌های مدلسازی مبتنی بر مکانیک شکست در زمینه شروع و انتشار ترک در مخلوط‌های آسفالتی است. از این رو مروری بر مبانی مکانیک شکست انجام شده و روش‌های نظری بررسی ترک خوردگی بتن آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

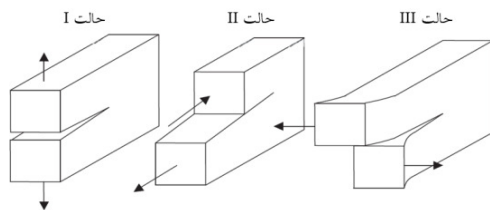
خرابی‌های متنوع روسازی آسفالتی هم چون ترک خوردگی خستگی (پوست سوسماری)، ترک خوردگی طولی، ترک خوردگی حرارتی (عرضی) و ترک خوردگی انعکاسی به طور مستقیم به ویژگی‌های شکست مصالح آسفالتی به کار رفته در لایه‌های روسازی مرتبط هستند. مقاومت شکست مصالح آسفالتی به طور قابل ملاحظه‌ای بر عمر خدمت‌دهی روسازی‌های آسفالتی و در نتیجه بر هزینه‌های نگهداری و نوسازی شبکه روسازی تأثیرگذار است. بنابراین توجه خاصی روی درک سازوکار شکست در روسازی‌های آسفالتی و توسعه ابزارهای تحلیلی جهت انتخاب مصالح با مقاومت شکست بیشتر منعطف شده است.

۲- مبانی مکانیک شکست

مکانیک شکست نظریه‌ای برای تعیین گسیختگی

بررسی مسیرهای مختلف نفوذ ترک در مخلوط

رخ می‌دهد. بسته به نوع شرایط بارگذاری برای ایجاد ترک سه حالت شکست به صورت حالت I برای بازشدگی و حالات II و III برای لغزش (برش) تعریف می‌شوند. حالت I ترک ناشی از کشش است. حالت II ترک برشی به صورت لغزش و حالت III ترک برشی به صورت پاره‌شدگی (پیچش) است (Mojiri, 2010) (شکل ۱).



شکل ۱. حالات تنش ترک ها (Mojiri, 2010)

۳- مکانیک شکست مخلوط آسفالتی

سازوکار ترک‌خوردگی در مخلوط آسفالتی به کمک نظریه مکانیک شکست که مکانیک شروع و انتشار ترک را با خواص مکانیکی مصالح ترکیب می‌کند، بهتر درک می‌شود. مدل مکانیک شکست مخلوط آسفالتی که در سال ۲۰۰۱ توسط Zhang و همکاران در دانشگاه فلوریدا توسعه یافت، یک قانون رشد ترک پایه برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی فراهم نمود. سازوکار شکست مخلوط آسفالتی از دو نظریه اساسی ویسکوالاستیک خطی و مکانیک شکست انرژی مینا تبعیت می‌کند (Lin, 2011).

آستانه خرابی وجود دارد که پیشروی گام به گام ترک‌های ماکرو در هر نقطه‌ای در مخلوط را تعریف می‌کند. خرابی زیر این آستانه به عنوان ریزخرابی (یعنی خرابی که مرتبط با شروع و رشد ترک نیست) بررسی می‌شود و به نظر می‌رسد بعد از یک دوره استراحت قابل ترمیم است. از طرفی خرابی ماکرو (یعنی خرابی مرتبط با شروع و رشد ترک) قابل ترمیم نیست و زمانی رخ می‌دهد که خرابی از این آستانه فراتر می‌رود (Roque, Zhang and Sankar, 1999). Zhang و همکاران نشان دادند که حد انرژی کرنشی خزشی مستهلک شده (DCSE) و حد

مصالح با معیارهای انرژی و مقاومت است و گسیختگی انتشار یافته در سازه را بررسی می‌نماید. این نظریه به طور گسترده‌ای در مدلسازی شکست بتن آسفالتی به خصوص ترک‌خوردگی خستگی به کار می‌رود. با معرفی مفاهیم جدیدی چون فاکتور تشدید تنش و نرخ آزادسازی انرژی توسط Irwin (۱۹۵۷) شالوده مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) بنا شد. فرض کلیدی LEFM آن است که اندازه ناحیه فرایند در جلوی نوک ترک در مقایسه با ابعاد نمونه یا ساختار موردنظر قابل چشم‌پوشی است (Mojiri, 2010).

با پیشرفت فناوری، مصالح جدیدی با شکل‌پذیری و دوام شکست^۱ بیشتر تولید شدند که برای آن‌ها فرضیات LEFM معتبر نبود. در مواردی که اندازه ناحیه فرایند در مقایسه با ابعاد نمونه یا ساختار قابل چشم‌پوشی نبود، LEFM نمی‌توانست برای تحلیل ناحیه فرایند به کار رود. در چنین مصالحی، مکانیک شکست الاستیک پلاستیک (EPFM^۲) راه حل را فراهم نمود. EPFM در دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ مطرح شد. مقالات J.R.Rice (۱۹۶۸) پیشرفت قابل ملاحظه‌ای را در EPFM ایجاد کرد. وی تغییرشکل پلاستیک را به صورت یک پدیده الاستیک غیرخطی ایده‌آل سازی کرد و قادر به تعمیم نرخ آزادسازی انرژی برای چنین مصالحی بود. او این موضوع را برحسب انتگرال مستقل از مسیر موسوم به انتگرال J بیان کرد. انتگرال J راهی برای توصیف حالتی است که در آن تغییرشکل نوک ترک به اندازه‌ای است که از تقریب الاستیک خطی تبعیت نمی‌کند. Rice (۱۹۶۸) نشان داد که این انتگرال مستقل از مسیر و برابر نرخ آزادسازی انرژی است (Mojiri, 2010). برای مصالح تحت خزش پایدار، Landes, Ohji, Begley و همکاران و Nikbin و همکاران (۱۹۷۶) روش انتگرال C* را ارائه نمودند که این انتگرال نیز مستقل از مسیر بود (Wang, 2011).

در مکانیک شکست، یک ترک به صورت جداشدگی (گسستگی) مصالح ناشی از بازشدگی یا لغزش تعریف می‌شود. این جداشدگی در مقیاس ریزساختارها در مصالح

$$2r = \left(\frac{\sigma_{FA}}{\sigma_0}\right)^2 a \quad (1)$$

که در آن r طول ناحیه فرایند، σ_{FA} تنش یکنواخت دور از نوک ترک و σ_0 حد تنش بیشینه و a نصف طول ترک است. با ناحیه فرایند تعریف شده، هندسه و مسیر ترک جدید به آسانی توسط گسترش ترک موجود به اندازه طول ناحیه فرایند مشخص می‌شود. مدل شکست مخلوط آسفالتی رشد ترک غیرممتد را توسط افزایش طول ترک در بازه‌های برابر با اندازه طول هر ناحیه فرایند توصیف می‌کند (Sangpetngam, Birgisson and Roque, 2003). جزییات مربوط به تعیین توزیع تنش، تنش‌های میانگین و DCSE تجمعی در هر ناحیه فرایند در (Zhang et al., 2001) آمده است.

۴- روش‌های مدلسازی شکست و خستگی مخلوط‌های آسفالتی

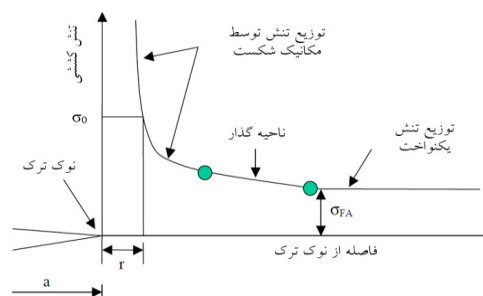
سازوکارهای بنیادین خستگی بتن آسفالتی پیچیده هستند. در حالت کلی خستگی تجمع خرابی در مصالح تحت اثر بارگذاری تکراری است. تجمع خرابی خستگی در مخلوط‌های آسفالتی منجر به ترک خوردگی می‌شود که یکی از خرابی‌های اصلی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر است. خواص خستگی بتن آسفالتی معمولاً توسط آزمایش‌های بار تکراری به دست می‌آیند. مدل‌های اولیه خستگی مخلوط‌های آسفالتی، فرمول‌های پدیدارشناختی ساده خستگی تحت بارهای دوره‌ای هستند. علاوه بر این مدل‌های خستگی بر پایه خرابی پیوسته یا مکانیک شکست توسعه یافته‌اند. روش‌های عددی مبتنی بر رویکرد ناحیه چسبنده نیز در این زمینه مطرح شده‌اند (Wang, 2011).

۴-۱- مدل‌های پدیدارشناختی تجربی

مدل‌های این دسته بر اساس داده‌های آزمایشگاهی توسعه یافته‌اند و عمرخستگی (حداکثر تعداد مجاز تکرار بار N_f) را به کرنش کششی (ϵ_i) و مدول دینامیک (E^*) مخلوط مرتبط می‌کنند. یک مدل معمول در این زمینه در

انرژی شکست (FE) مخلوط‌های آسفالتی به ترتیب آستانه‌های پایین و بالا را به خوبی تعریف می‌کنند (Zhang et al., 2001). این حدود انرژی به سادگی از پاسخ تنش-کرنش آزمایش مقاومت کششی و آزمایش مدول برجهنگی با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم سوپرپیو به دست می‌آیند (Sangpetngam, Birgisson and Roque, 2003).

مشخص شده که DCSE مستقل از حالت بارگذاری و تاریخچه بارگذاری است. DCSE به وسیله تفاوت بین انرژی شکست (FE) و انرژی الاستیک (EE) برای یک بار منفرد به دست می‌آید. FE سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا کرنش گسیختگی است (Lin, 2011). شکل (۲) یک توزیع تنش کششی در مجاورت ترک در معرض تنش یکنواخت یک بُعدی را نشان می‌دهد. در این شکل مکانیک شکست الاستیک خطی فرض می‌کند که تنش‌ها در نوک ترک به بی‌نهایت نزدیک می‌شوند اما مکانیک شکست مخلوط آسفالتی برای به حساب آوردن این حقیقت که تنش در هر نقطه‌ای در مخلوط نباید از حد بیشینه تجاوز کند توزیع تنش‌ها را مطرح می‌کند (Sangpetngam, Birgisson and Roque, 2003).



شکل ۲. توزیع تنش در جلوی نوک ترک (Sangpetngam, Birgisson and Roque, 2003)

(Birgisson and Roque, 2003)

وقتی انرژی کرنشی نشانگر خرابی، در ناحیه فرایند از آستانه انرژی تجاوز کند، ترک به اندازه طول ناحیه فرایند انتشار می‌یابد. برای مسأله ترک در معرض کشش یکنواخت تک بُعدی (شکل ۲)، رابطه (۱) برای طول ناحیه فرایند بیان می‌شود.

رابطه (۲) ارایه شده است.

$$N_f = k_1(\varepsilon_t)^{-k_2}|E^*|^{-k_3} \quad (2)$$

که در آن k_1 ، k_2 و k_3 ضرایب رگرسیون هستند. برخی دیگر از مدل‌های این دسته عبارتند از: مدل Monismith (۱۹۶۹)، مدل‌های Shell و انستیتو آسفالت (AI)، مدل Tayebali (۱۹۹۶) تحت پروژه شارپ (SHRP Project A-003A)، مدل Medani و Molenaar (۲۰۰۰)، مدل راهنمای طراحی روسازی مکانستیک-تجربی (MEPDG) (۲۰۰۲)، مدل El-Basyouny و همکاران (۲۰۰۵) (Wang, 2011).

می‌شود. Uzan مدل توسعه‌یافته توسط Tayebali و همکاران در پروژه SHRP A-003A را به عنوان مدل شروع ترک خوردگی پذیرفت. قانون پاریس به عنوان مدل انتشار ترک استفاده شد که در رابطه آمده است.

(۳)

در این رابطه c طول ترک، N تعداد تکرار بار، ΔK تفاوت بین فاکتور تشدید تنش بیشینه و کمینه است و n و A پارامترهای شکست قانون پاریس برای بتن آسفالتی است (Wang, 2011).

۴-۳- مدل‌های ناحیه چسبنده برای شبیه‌سازی

عددی

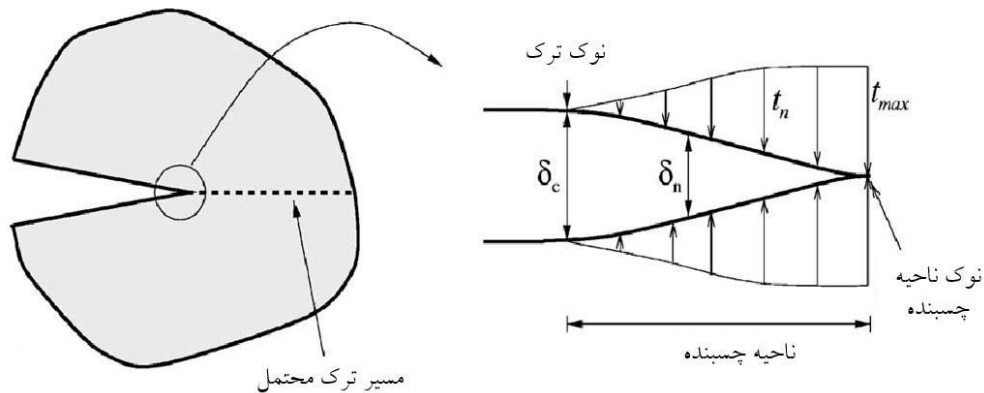
ایده توصیف شکست به صورت جداشدگی مصالح در امتداد سطح که در ۱۹۶۲ توسط Barenblatt مطرح شد مبنای مدل ناحیه چسبنده (CZM) است. ناحیه چسبنده، سطحی در یک مصالح حجمی است که تغییرات ناگهانی تغییر مکان در آن رخ می‌دهد. پیوستگی مصالح همراه با تغییرات ناگهانی به شکل پرش تغییر مکان ادامه می‌یابد. معادلاتی که پرش‌های تغییر مکان عمودی و مماسی در امتداد سطوح چسبنده را با نیروهای مناسب مرتبط می‌کنند یک مدل ناحیه چسبنده را تعریف می‌کنند (Wang, 2011). شکل (۳) مفهوم ناحیه چسبنده را در حالت بازشدگی (حالت I) نشان می‌دهد که در آن T_n و δ_n بیانگر نیروی نرمال و پرش تغییر مکان نرمال هستند. نوک ترک مصالح نشانگر نقطه‌ای با نیروی صفر و نوک ناحیه چسبنده معرف نقطه‌ای است که نیرو در آن به مقدار بیشینه خود می‌رسد (Song, Paulino and Buttlar, 2006).

۴-۲- مدل‌های مبتنی بر مکانیک شکست

این مدل‌ها از قانون انتشار ترک برای مکانیک شکست الاستیک خطی و غیرخطی استفاده می‌کنند. برای مکانیک شکست الاستیک خطی اغلب از قانون پاریس استفاده می‌شود. برای مکانیک الاستیک غیرخطی نیز بیشتر انتگرال J به کار می‌رود (Wang, 2011).

Owusu-Antwi و همکاران (۱۹۹۸) اصول مکانیک شکست را به کار گرفتند و مدل عملکرد مبتنی بر مکانستیک را برای پیش‌بینی مقدار ترک‌های انعکاسی در روسازی‌های مرکب توسعه دادند. تعداد بار مجاز بر اساس قانون رشد ترک پاریس توسعه یافت. به دلیل ماهیت مکانستیک، مدل برای پیش‌بینی عملکرد جهت کنترل طراحی و مدیریت روسازی مؤثر بود (Wang, 2011).

Uzan (۲۰۰۷) ترک خوردگی خستگی را به صورت یک فرایند دومرحله‌ای شامل شروع ترک خوردگی و انتشار ترک مدل کرد. مرحله شروع ترک خوردگی توسط آزمایش‌های معمول خستگی مشخص می‌شود و مرحله انتشار ترک با استفاده از قانون پاریس-اردوغان توصیف



شکل ۳. نمایش شماتیک مفهوم ناحیه چسبنده (Song, Paulino and Buttlar, 2006)

است که اندازه نسبی ناحیه فرایند شکست در مقایسه با اندازه سازه افزایش می‌یابد. در این مطالعه مدل ناحیه چسبنده سهموی به کار رفت (Wang, 2011).

۴-۴- روش ناپیوستگی تعبیه شده (EDM)

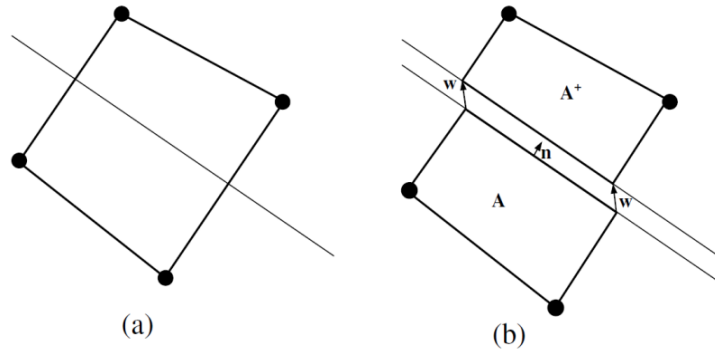
در این روش فرض می‌شود مصالح تحت بررسی قبل از وقوع ترک خطی الاستیک هستند. با این فرض، میدان تغییر مکان مربوط به هر المان می‌تواند متشکل از دو بخش الاستیک (u^e) و ترک‌خوردگی (u^c) باشد که در رابطه (۴) آمده است.

$$u = u^e + u^c \quad (4)$$

تغییر مکان الاستیک (u^e) در المان هموار و پیوسته است اما تغییر مکان ترک‌خوردگی (u^c) ناپیوسته (گسسته) است و یک پرش در امتداد سطح برخورد ترک تعبیه شده است. یک المان نمونه در EDM در شکل (۴) نشان داده شده است که در آن یک ترک در المان تعبیه شده است (Wu , Denneman and Harvey, 2009).

بر اساس توابع پایه استفاده شده، مدل‌های ناحیه چسبنده به چهار دسته چندخطی، چندجمله‌ای، مثلثاتی و توانی تقسیم‌بندی می‌شوند. تقریباً تمام این مدل‌ها به این صورت عمل می‌کنند که نیروها افزایش می‌یابند و به یک مقدار بیشینه می‌رسند و سپس با افزایش جداشدگی به صفر نزدیک می‌شوند. Needleman (۱۹۸۷) مدل‌های ناحیه چسبنده را در زمینه محاسبات وارد کرد. از آن پس، این مدل‌ها به طور گسترده به عنوان ابزاری برای بررسی شکست مصالح استفاده می‌شوند و در سال‌های اخیر در شبیه‌سازی بتن آسفالتی به کار رفته‌اند. Kim (۲۰۰۸) یک روش المان گسسته دسته‌بندی شده را برای بررسی سازوکار شکست بتن آسفالتی در دماهای پایین به کار برد. مدل ناحیه چسبنده دوخطی برای شبیه‌سازی شروع ترک‌خوردگی و پیشروی ترک در روش المان گسسته استفاده شد (Wang, 2011).

Song و همکاران (۲۰۰۵ و ۲۰۰۶) مدل‌های ناحیه چسبنده دوخطی و توانی را برای توصیف ترک‌خوردگی بتن آسفالتی مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها مطالعه دیگری (۲۰۰۸) را برای بررسی پارامتر مهم شکل نرم‌شدگی در مدل ناحیه چسبنده انجام دادند. این پارامتر زمانی مهم



شکل ۴. یک المان محدود با ترکی به صورت بازشدگی یکنواخت: (a) بدون ترک خوردگی و (b) با پرش تغییر مکان یکنواخت در راستای خط ترک (Wu, Denneman and Harvey, 2009)

تعیین تغییر مکان الاستیک مورد نیاز است (Wu, Denneman and Harvey, 2009).

۴-۵- روش ناپیوستگی تغییر مکان (DDM)

روش المان مرزی ناپیوستگی تغییر مکان^۳ (DD) یک روش عددی برای تحلیل مکانستیک تنش‌ها و تغییر مکان‌هاست. ویژگی‌های این روش با روش معروف المان محدود (FEM) قابل مقایسه‌اند. در واقع روش DD قادر به حل هر مسأله الاستیکی است که با FEM حل می‌شود (Birgisson, Sangpetngam and Roque, 2002).

اصول روش DD، مفهوم شناخته‌شده الاستیسیته خطی است که تغییر مکان معلوم (گسسته) یک نقطه در هر جای جسم، اجازه حل و به دست آوردن تنش‌ها و تغییر مکان‌ها در تمام نقاط دیگر را می‌دهد. ترک‌ها، شیارها و درزها نمونه‌هایی از تغییر مکان‌های گسسته هستند. بنابراین روش DD، تنش‌ها و تغییر مکان‌ها در یک جسم الاستیک را بر حسب ناپیوستگی‌های تغییر مکان برشی و نرمال در یک یا چند المان از جسم حل می‌کند. این بدین معناست که روش DD می‌تواند به طور مستقیم برای محاسبه تغییر مکان در امتداد و عمود بر هر سطح ترک استفاده شود که باعث می‌شود روش مناسب و منحصر به فردی برای مسائل ترک باشد (Birgisson, Sangpetngam and Roque, 2002).

برای مدل کردن یک ترک واقعی با روش DD، ترک

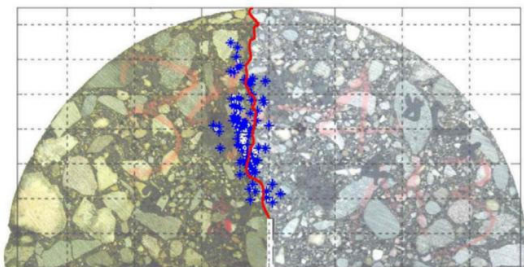
المان توسط خط ترک به دو قسمت مجزا (دو زیر المان) تقسیم شده است که به صورت A^+ و A^- نشان داده شده است. برای ساده‌سازی مدل، فرض می‌شود پرش‌های جابجایی در امتداد خط ترک در هر المان ثابت باشند و در نتیجه پرش به صورت بردار w بیان می‌شود. تغییر مکان ترک خوردگی روی زیر المان مرجع A^- برابر صفر و روی زیر المان حرکت کرده A^+ برابر w است. با دنبال کردن روش FEM استاندارد، میدان‌های تغییر مکان مربوط به المان با استفاده از توابع شکل المان محدود از تغییر مکان‌های گرهی درونیابی می‌شوند. این موضوع در رابطه (۵) بیان شده است.

$$u = \sum_{\alpha \in A} N_{\alpha} u_{\alpha} = \sum_{\alpha \in A} N_{\alpha} (u_{\alpha}^e + u_{\alpha}^c) = \sum_{\alpha \in A} N_{\alpha} u_{\alpha}^e + \sum_{\alpha \in A^+} N_{\alpha} w \quad (5)$$

که در آن زیر نویس α نشانگر شماره گره و N بیانگر تابع شکل المان محدود است. توجه شود که تغییر مکان‌های ترک خوردگی درونیابی شده در امتداد خط ترک پیوسته می‌شوند و دقیقاً تنها روی نقاط گرهی هستند. استفاده از تغییر مکان به جای کرنش دلیلی مبنی بر این است که EDM مشکل وابستگی به ϵ را ندارد، در حالی که این مشکل در مدلسازی بر مبنای مکانیک پیوسته آشکار است. مزیت دیگر EDM این است که با وجود تغییر مکان کلی بزرگ نظریه کرنش کوچک در آن معتبر است که برای

۴-۷- روش انتشار صوتی (AE)

لی و همکاران تحقیقی در مورد مشاهده انتشار ترک در مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش انتشار صوتی (AE) انجام دادند. شکست در مصالح شبه‌شکننده با تشکیل ریزترک‌هایی که انرژی را به صورت امواج الاستیک رها می‌کنند، مرتبط است که به این انتشار امواج الاستیک، انتشار صوتی گفته می‌شود. آن‌ها به بررسی استفاده از AE در تعیین رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای کم و تعیین مسیر ترک پرداختند. این روش برای آزمایش‌های شکست صورت گرفته روی نمونه‌های خمشی نیم دایره (SCB^1) در دماهای پایین به کار رفت. تعیین محل ریزترک‌ها توسط روش مذکور در تطابق خوبی با مسیر رشد ترک مشاهده شده در مطالعه آزمایشگاهی بود (Li et al., 2006) (شکل ۶).



شکل ۶. نحوه تعیین مکان ترک به روش AE روی سطح نمونه SCB (Li et al., 2006)

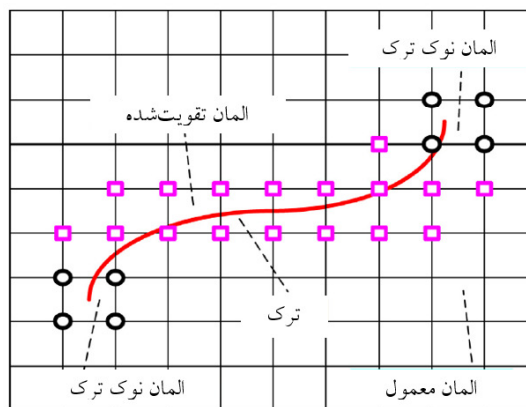
۴-۸- سیستم تطابق تصاویر دیجیتال (DICS)

DICS قادر به فراهم کردن میدان کرنش (تغییر مکان) دقیق مصالح مرکب در سطح ریزساختارهاست و بنابراین برای تشخیص رفتار ترک‌خوردگی مصالح در هنگام شروع ترک مناسب است. این روش مبتنی بر کاربرد دقیق تکنیک تطابق تصویر ساختگی همراه با پیکره‌بندی درست آزمایش (بهسازی سطح نمونه) است. یک سری عکس‌های متوالی نمونه بارگذاری شده توسط دوربین دیجیتال گرفته شده و الگوهای ساختگی خاکستری رنگ روی سطح نمونه ایجاد می‌شوند. این الگوها به دقت طی مدت بارگذاری دنبال می‌شوند. ماهیت روش، مقایسه کردن مقادیر تیرگی

توسط یک سری المان‌های DD متصل به هم شبیه‌سازی می‌شود. به محض توسعه طول ترک، رشد ترک می‌تواند به جای مش‌بندی مجدد کل جسم در روش المان محدود به سادگی با افزودن المان‌های DD ثابت بیشتر مشخص شود. دقت راه‌حل‌های المان محدود، وابسته به تعداد المان‌های استفاده شده برای توصیف جسم است. تعداد المان بیشتر در مسأله دقت بیشتر راه‌حل را دربردارد. با این وجود المان‌های بیشتر، معادلات مجهول بیشتر ایجاد می‌کند که زمان محاسبات بیشتری نیاز دارد. روش DD تنها نیاز به قرار دادن المان روی مرزهای جسم دارد (Birgisson, Sangpetngam and Roque, 2002).

۴-۶- روش المان محدود توسعه یافته^۴ (XFEM)

XFEM به تازگی جهت بررسی رشد ترک‌های منتشر شده درون المان‌های پیوسته به وسیله تکنیک‌های تقویتی^۵ ایجاد شده است. XFEM شامل توابع تقویتی برای حل مسائل ترک گسسته است و مسیر ترک و مرزهای اجزای مخلوط بر پایه روش مجموعه سطوح تراز هندسی بررسی می‌گردند. محاسبه فاکتورهای تشدید تنش (SIF) و تعیین رشد ترک نیز به کمک XFEM قابل توضیح است. تفاوت این روش با FEM در توانایی بررسی ترک گسسته است (Ng, Dai, 2011) (شکل ۵).



شکل ۵. نمایش گره‌های تقویت شده در XFEM (Wang et al., 2013)

(2013)

آزمایش‌های کشش تک‌محوره، تیرچه خمش سه نقطه شیاردار (SEB^v) و SCB مناسب بود ولی در مورد آزمایش کشش قطری غیرمستقیم مطلوب نبود (Wu, Denneman and Harvey, 2009).

داو و همکاران (۲۰۱۱) مدل و نرم‌افزار پیش‌بینی ترک‌خوردگی حرارتی روسازی‌های آسفالتی را ارائه نمودند. مشخص شد که یک مدل شکست ناحیه چسبنده همراه با تحلیل گر المان محدود ویسکوالاستیک، روش مناسبی برای شبیه‌سازی ترک‌خوردگی حرارتی روسازی‌های آسفالتی است. این رویکرد با موفقیت برای مدلسازی ترک‌خوردگی حرارتی در مقاطع آزمایش متنوع به کار رفت (Dave, Leon and Park, 2011).

Kim و Aragão (۲۰۱۱) ویژگی‌های شکست مخلوط‌های آسفالتی را براساس مدلسازی ناحیه چسبنده و تکنیک تطابق تصویر دیجیتال (DICT) تعیین کردند. در این مطالعه یک رویکرد یکپارچه شامل آزمایش‌ها و مدلسازی محاسباتی برای تعیین خواص شکست مخلوط‌های آسفالتی در معرض طیف وسیعی از نرخ‌های بارگذاری و در شرایط دمایی متوسط ارائه شد. تکنیک DIC می‌تواند به دقت فرایند شکست نوک ترک را برداشت کرده و به طور مؤثری با مدلسازی عددی شکست ناحیه چسبنده جهت شناسایی خواص شکست موضعی مصالح آسفالتی در دماهای متوسط به کار رود. مدل ناحیه چسبنده دوخطی به کار رفته در شبیه‌سازی المان محدود مخلوط، سازگاری خوبی با نتایج آزمایش شکست نشان داد (Aragão, Kim, 2011).

یانگ و همکاران (۲۰۱۲) یک فناوری مدلسازی شکست ساختار در مقیاس میانی، توسعه داده شده توسط ترکیب الگوریتم ایجاد و تراکم سنگدانه و المان‌های چسبنده را ایجاد نمودند. این تکنیک به منظور شبیه‌سازی فرایند پیچیده انتشار ترک دو بُعدی در مخلوط‌های آسفالتی ناهمگن و ارزیابی اثرات توزیع سنگدانه و پارامترهای شکست روی عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی ایجاد شد. مشخص شد که ریزترک‌ها همیشه از سطح برخورد

تصاویر نمونه تغییرشکل یافته با مقادیر نمونه اولیه است. مزیت اصلی استفاده از سیستم تطابق تصویر، امکان تعیین مکان نقاط مشخصی است که در آن‌ها ترک‌ها شروع شده و انتشار می‌یابند. هم چنین این سیستم اجازه تعریف میدان کرنش کامل در یک سطح محدود روی سطح نمونه را با استفاده از اندازه‌گیری تغییرمکان در مقیاس کمتر از میکرون می‌دهد (Birgisson, Montepara and Napier, 2006).

۵- برخی مطالعات مبتنی بر مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی

Birgisson و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای به اندازه‌گیری و تحلیل انرژی شکست مخلوط آسفالتی با استفاده از تحلیل‌های میکرومکانیکی پرداختند. چگالی انرژی شکست از طریق آزمایش SCB ارزیابی شد. تحلیل‌های آزمایشگاهی با سیستم تطابق تصویر دیجیتال (DICS) همراه شدند. رفتار شکست برآیند در SCB جهت مدل کردن ریزساختار مخلوط‌های آسفالتی و نیز پیش‌بینی چگالی انرژی شکست آن‌ها با استفاده از روش جزء مرزی گسستگی تغییرمکان (DD) پیش‌بینی شد. پارامترهای ورودی برای مدل میکرومکانیکی گسستگی تغییرمکان (DD) نمونه SCB از آزمایش کشش غیرمستقیم سوپرپیو به دست آمدند. نتایج حاکی از آن بود که الگوهای پیش‌بینی شده شروع و گسترش ترک با رفتار ترک‌خوردگی مشاهده شده سازگارند. نتایج هم چنین نشان دادند که شکست در مخلوط‌ها به خوبی با استفاده از رویکرد میکرومکانیکی که رشد ترک در امتداد سطوح سنگدانه و از میان سنگدانه را به حساب می‌آورد، قابل مدلسازی است (Birgisson, Montepara and Napier, 2006).

Wu و همکاران (۲۰۰۹) یک روش گسستگی تعبیه شده (EDM) برای تحلیل المان محدود ترک‌خوردگی بتن آسفالتی را مورد بررسی قرار دادند. بنابر نتایج مشخص شد که EDM برای شبیه‌سازی رفتار شروع و انتشار ترک در

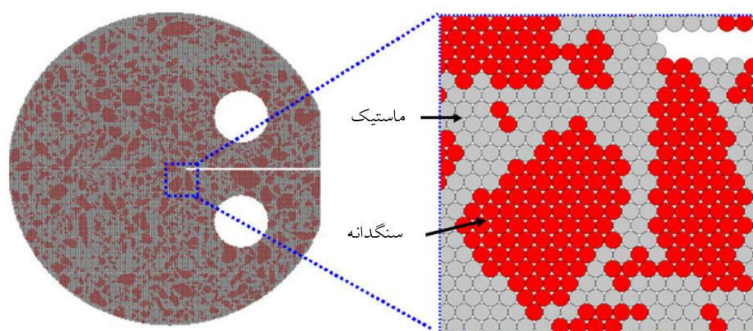
داشت (Wang et al., 2013). Dai و Ng (۲۰۱۱) رفتار شکست مصالح زیرساختی (بتن و آسفالت) را با توسعه مکانیک شکست المان محدود توسعه یافته (XFE-FM) و تحلیل تصویر بررسی نمودند. مسیرهای شکست پیش‌بینی شده در نمونه‌های دیجیتالی به خوبی با نتایج آزمایشگاهی تطابق داشتند. این موضوع نشان می‌دهد که روش XFE-FM توسعه یافته برای پیش‌بینی رفتار شکست مخلوط آسفالتی (ناهمگن) قابل اعتماد است (Ng, Dai, 2011).

کیم و باتل (۲۰۰۹) یک مدل شکست المان گسسته (DEM^۸) برای آزمایش شکست حالت I را با در نظر گرفتن ناهمگنی مصالح جهت مطالعه رفتارهای گوناگون شکست بتن آسفالتی ارائه نمودند. هدف از این مطالعه نشان دادن مزایای بالقوه پیش‌بینی عددی برای سازوکارهای متنوع شکست مصالح ناهمگن بود. ریزساختار نمونه آسفالتی با استفاده از تحلیل تصویر با دقت بالا در یک مِش DEM دسته‌بندی شده نگاشته شد (شکل ۷). شبیه‌سازی‌های عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی در دماهای متفاوت و با انواع مخلوط‌ها داشت. علاوه بر این مدل شکست المان گسسته ناهمگن، پتانسیل اندازه‌گیری توزیع تنش و ترک را همراه با تعیین پاسخ‌های شکست کلی دارا بود. شبیه‌سازی می‌تواند برای کاهش تعداد آزمایش‌های گران و زمان‌بر مورد نیاز استفاده شود (Kim, Buttlar, 2009).

سنگدانه و قیر مشخص می‌شوند. تنها تعداد کمی از ریزترک‌ها رشد می‌کنند و ترک‌های درشت را شکل می‌دهند. در نهایت مشخص شد که توزیع سنگدانه درشت و مقاومت چسبندگی سطح برخورد قیر و سنگدانه اثر قابل‌ملاحظه‌ای روی رفتار شکست مخلوط آسفالتی دارند (Yang et al., 2012).

یانگ و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله‌ای به مدل‌سازی شکست دو بُعدی و سه بُعدی مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه‌های با توزیع اتفاقی و ترک‌های چسبنده (پیوسته) تعبیه‌شده پرداختند. از آنجایی که منحنی به دست آمده از شبیه‌سازی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک بود، مدل‌ها و پارامترهای ساختاری ناحیه چسبنده برای شبیه‌سازی پیشنهاد شدند (Yang, Yin and Yang, 2013).

وانگ و همکاران (۲۰۱۳) رشد ترک شبیه‌سازی شده با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته (XFEM) در مخلوط‌های آسفالتی اصلاحی با لاستیک را با آزمایش SCB مقایسه کردند. شبیه‌سازی عددی جهت بررسی انتشار ترک مخلوط‌ها کارآمد و مفید بود زیرا منحنی بار در مقابل تغییر مکان عمودی نقطه بارگذاری (P-LPVD) به دست آمده از شبیه‌سازی عددی XFEM به خوبی با آزمایشات SCB همخوانی داشت. زمانی که لاستیک به مخلوط آسفالتی افزوده شد سرعت انتشار ترک کاهش یافت. میزان لاستیک برابر ۲۰ درصد وزنی قیر، بهترین عملکرد ضد ترک‌خوردگی در دمای پایین را به همراه



شکل ۷. مِش نمونه المان گسسته (DEM) با آرایش شش ضلعی (Kim, Buttlar, 2009)

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه روش‌های مبتنی بر مکانیک شکست در زمینه شروع و انتشار ترک در مخلوط‌های آسفالتی بررسی شدند. روش‌های ناحیه چسبنده، ناپیوستگی تعیبه شده (EDM)، ناپیوستگی تغییر مکان (DDM)، المان گسسته (DEM) و المان محدود توسعه یافته (XFEM)، انتشار صوتی (AE) و روش تطابق تصویر دیجیتال برای مدل‌سازی شکست مخلوط‌های آسفالتی بررسی شدند.

مدل‌های ناحیه چسبنده به طور گسترده‌ای برای بررسی و شبیه‌سازی فرایند شکست بتن آسفالتی به کار گرفته شده‌اند. روش EDM مشکل وابستگی به مش را نداشت و با وجود تغییر مکان‌های بزرگ نظریه کرنش کوچک را نقض نمی‌کرد. این روش برای شبیه‌سازی رفتار شروع و انتشار ترک در آزمایش‌های کشش تک‌محوره، SEB و SCB مناسب بود. روش XFEM نیز جهت بررسی رشد ترک و پیش‌بینی رفتار شکست المان‌های پیوسته و تعیین مقادیر فاکتور تنش مفید بود. روش انتشار صوتی برای بررسی مسیر رشد ترک در دمای پایین مناسب بود که نیاز به تأیید بیشتری دارد. DEM روش پیش‌بینی خوبی برای سازوکارهای شکست مصالح ناهمگن در دماهای متفاوت و برای مخلوط‌های مختلف بود. علاوه بر این، پتانسیل محاسبه توزیع تنش و ترک را همراه با تعیین پاسخ‌های شکست کلی دارا بود.

روش المان مرزی DD روش منحصر به فردی جهت بررسی مسائل ترک بود، نیاز به تعیین المان‌های کمتری داشت و همانند روش‌های المان محدود، با رشد ترک نیاز به مش‌بندی مجدد نداشت. کاربرد این روش برای حل مسائل پلاستیسیته پیچیده است، از این رو نیاز به توسعه برنامه‌های دوگانه که از روش المان محدود برای تحلیل نواحی پلاستیک و از روش المان مرزی برای تحلیل ترک استفاده می‌کنند، احساس می‌شود.

سیستم تطابق تصویر دیجیتال نیز که قابلیت کاربرد با سایر روش‌ها را دارد، قادر به تعیین میدان کرنش دقیق مصالح در سطح ریزساختارها است و برای تشخیص رفتار

مصالح در هنگام شروع ترک مناسب می‌باشد.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، همراه با مطالعات آزمایشگاهی، نیاز به بررسی تحلیلی و محاسباتی سازوکارهای شکست و ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی رایج در کشور با روش‌های مذکور احساس می‌شود. در این بین، استفاده از مدل‌های ناحیه چسبنده، به کارگیری روش‌های دوگانه المان محدود و المان مرزی و کاربرد تصاویر پرتونگاری رایانه‌ای جهت تشخیص و تعیین ریزساختارها توصیه می‌شود.

۷- مراجع

- Aragão, F. and Kim, Y. (2011) "Characterization of Fracture Properties of Asphalt Mixtures Based on Cohesive Zone Modeling and Digital Image Correlation Technique", Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Washington DC, January pp.23-27, 2011.
- Birgisson, B., Montepara, A. and Napier, J. (2006) "Micromechanical Analyses for Measurement and Prediction of Hot-Mix Asphalt Fracture Energy", Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1970, pp. 186-195.
- Birgisson, B., Sangpetngam, B. and Roque, R. (2002) "Prediction of the Viscoelastic Response and Crack Growth in Asphalt Mixtures using the Boundary Element Method", Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1789, pp. 129-135.
- Dave, E., Leon, S. and Park, K. (2011) "Thermal Cracking Prediction Model and Software for Asphalt Pavements", First Congress of Transportation and Development Institute (TDI), Chicago, Illinois, United States, March 13-16, 2011, American Society of Civil Engineers, pp. 667-676.
- Kim, H. and Buttlar, W. (2009) "Discrete fracture modeling of asphalt concrete", International Journal of Solids and Structures, Vol. 46, pp. 2593-2604.

- Wang, H., Zhang, C., Yang, L. and You, Z. (2013) "Study on the rubber-modified asphalt mixtures' cracking propagation using the extended finite element method", *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 223-230.
- Wang, L. (2011) "Mechanics of Asphalt: Microstructure and Micromechanics", New York: McGraw-Hill.
- Wu, R., Denneman, E. and Harvey, J. (2009) "Evaluation of an embedded discontinuity method for finite element analysis of hot mix asphalt concrete cracking", *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2127, pp. 82-89.
- Yang, X., Yin, A., Gao, H. and Zhu, H. (2012) "Tensile fracture simulation of random heterogeneous asphalt mixture with cohesive crack model", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 92, pp. 40-55.
- Yang, Z., Yin, A. and Yang, X. (2013) "2D and 3D fracture modeling of asphalt mixture with randomly distributed aggregates and embedded cohesive cracks", *Procedia IUTAM (IUTAM Symposium on Multiscale Problems in Stochastic Mechanics 2012)*, Vol. 6, pp. 114-122.
- Zhang, Z., Roque, R., Birgisson, B. and Sangpetngam, B. (2001) "Identification and Verification of a Suitable Crack Growth Law (with Discussion)", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 70, pp. 206-241.
- Li, X., Marasteanu, M., Iverson, N. and Labuz, J. (2006) "Observation of Crack Propagation in Asphalt Mixtures with Acoustic Emission", *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1970, pp. 171-177.
- Lin, S. (2011) "Evaluation of HMA Fracture Mechanics-Based Thermal Cracking Model", Department of Transport Science, Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology.
- Mojiri, S. (2010) "Numerical Analysis of Cohesive Crack Growth Using Extended Finite Element Method (X-FEM)", Nantes, France: Ecole Centrale de Nantes (ECN).
- NG, K. and Dai, Q. (2011) "Investigation of Fracture Behavior of Heterogeneous Infrastructure Materials with Extended-Finite-Element Method and Image Analysis", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 12, pp. 1662-1671.
- Roque, R., Zhang, Z. and Sankar, B. (1999) "Determination of Crack Growth Rate Parameters of Asphalt Mixtures Using the Superpave Indirect Tension Test (IDT)", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 68, pp. 404-433.
- Sangpetngam, B., Birgisson, B. and Roque, R. (2003) "Development of an Efficient Hot Mix Asphalt Fracture Mechanics-Based Crack Growth Simulator", *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1832, pp. 105-112.
- Song, S., Paulino, G. and Buttlar, W. (2006) "Simulation of Crack Propagation in Asphalt Concrete Using an Intrinsic Cohesive Zone Model", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 132, No.11, pp. 1215-1223.

