

## شبیه سازی سازوکار انتقال برش در روسازیهای بتنی

علیرضا مرادی (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مسعود سلطانی محمدی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

عباسعلی تسنیمی، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: msoltani@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۲/۰۹

### چکیده

عمل شاخه‌ای و قفل و بست بین دانه‌های بتن، دو سازوکار اصلی در انتقال برش در انواع اتصالات و سطوح ترک خورده بتن مسلح است. عمل شاخه‌ای تنها عامل انتقال برش در اتصال سازه‌ها و اعضای پیش ساخته مانند برخی روسازیهای بتنی است. رفتار روسازیها متأثر از عملکرد و میزان قابلیت انتقال نیرو از درزها و اتصالات آنهاست. کارآیی و عمر مفید این سازه‌ها به طور مستقیم وابسته به نیروهای انتقالی است. بنابراین تحلیل عملکرد درزها و اتصالات روسازیها نقش مهمی در این مورد دارد که خود نیز، وابسته به بکارگیری مدل‌های رفتاری مناسب برای شبیه سازی سازوکار انتقال نیروست. در این مقاله، سازوکار انتقال برش به واسطه میلگردهای عبوری (شاخه‌ای) در روسازیهای بتنی بر اساس تئوری تیر بر بستر ارتجاعی، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و برای اندرکنش غیرخطی بتن و میلگرد توسعه و تعمیم یافته است. هدف اصلی، ارایه و بکارگیری روشی است که در عین کارآیی و دقت، موجب کاهش چشمگیر حجم محاسبات و در نهایت زمان تحلیل باشد. صحت مدل در دو قسمت و بر اساس داده‌های آزمایشگاهی موجود در سطوح تماسی و روسازیهای بتنی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: روسازیهای بتن مسلح، عمل شاخه‌ای، برش

## ۱. مقدمه

برخی پژوهشگران در کنار نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی، برخی روابط و مدل‌های تجربی را برای تعیین رابطه نیرو- تغییر مکان شاخه‌ای ارایه کرده‌اند. از آنجا که این گونه روابط با توجه به نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی خاصی ارایه شده‌اند، بنابراین از جامعیت کافی برخوردار نیستند. دی پولی و همکاران [Dei Poli et al., 1992] بر اساس نتایج حاصل از برخی مطالعات آزمایشگاهی، رابطه‌ای برای بیان کامل رابطه نیرو- تغییر مکان شاخه‌ای به صورت یکنوا ارایه کردند. این رابطه بر اساس تئوری تیر بر بستر ارتجاعی<sup>۲</sup> (BEF) استخراج شده و همچنین فرض شده که تشکیل مفصل پلاستیک در میلگرد و حذف بستر بتنی به‌طور همزمان به وقوع می‌پیوندد. همچنین دی پولی و همکاران بر اساس تئوری تیر بر بستر ارتجاعی، رابطه‌ای برای شبیه سازی رابطه نیرو- تغییر مکان شاخه‌ای در هر لحظه ارایه کردند. گرچه رویکرد مورد استفاده در مدل سروشیان و همکاران نیز مشابه دی پولی و همکاران است، اما استفاده از مقادیر واقعی تر و مناسب تر برای فنرهای بستر، به عنوان بتن محصور کننده موجب شده تا مدل دی پولی و همکاران دقت بیشتری داشته باشد.

اولین مدل تحلیلی برای عمل شاخه‌ای توسط تیموشنکو و لسزلز<sup>۳</sup> [El-Ariss, 2007] ارایه شد. این مدل بر اساس مدل تیر بر بستر ارتجاعی پیشنهاد شد که در واقع میلگرد نقش تیر، و بتن محصور کننده آن، نقش بستر ارتجاعی را دارد. زمانی که میلگرد تحت بارگذاری برشی قرار می‌گیرد، میلگرد و بتن بستر به صورت ارتجاعی رفتار می‌کنند، اما با ادامه بارگذاری بتن بستر شروع به خرد شدن کرده و میلگرد نیز به صورت تدریجی جاری می‌شود. بنابراین، این گونه مدلها نمی‌توانند رفتار کلی عمل شاخه‌ای را به صورت مناسبی شبیه سازی کنند.

مائاکاوا و قریشی [Maekawa and Qureshi, 1996, 1997] مدلی ارایه کردند که در واقع در محدوده ارتجاعی بر اساس مدل (BEF) است. با تعریف پارامتر اندیس خرابی، تسلیم میلگرد و ترک خوردگی در بتن بستر نیز شبیه سازی می‌شود. البته لازم به یادآوری است که بر خلاف اکثر مدل‌های ارایه شده، در این مدل همزمانی لغزش برشی و لغزش محوری (بیرون کشیدگی میلگرد)

انتقال برش در روسازیهای بتنی<sup>۱</sup> به طور عمده توسط عمل شاخه‌ای و قفل و بست بین دانه‌های بتن صورت می‌گیرد. در ترکهای بتن مسلح، قفل و بست بین دانه‌های بتن، عموماً سهم بیشتری دارند. با ادامه بارگذاری و افزایش میزان عرض ترک، مشارکت این سازوکار کاهش می‌یابد، بنابراین، عمدتاً در ترکهایی با عرض بیش از ۱ میلی‌متر، سازوکار فوق چندان تاثیرگذار نیست [Maitra et al., 2009]. بنابراین طبیعتاً در درزها و اتصالهای پیش ساخته سازوکار مذکور هیچگونه مشارکتی نداشته و سهمی در انتقال برش ندارد. در واقع در چنین اتصالهایی تنها عامل انتقال برش، میلگردهای عبوری (سازوکار شاخه‌ای) است. در روسازیهایی که تنها توسط میلگردهای شاخه‌ای به یکدیگر متصل شده‌اند، تنها عامل مقاوم در برابر برش، عمل شاخه‌ای است. در واقع حضور میلگردهای شاخه‌ای باعث اتصال روسازیها به یکدیگر شده و موجب می‌شود تا این اعضاء در مجموع به صورت یکپارچه، بارهای اعمالی را به بستر منتقل کنند.

عمل شاخه‌ای در طی سالهای گذشته توسط پژوهشگران بسیاری به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته است. وینتزیلیو و تاسیوس [Vintzeleou and Tassios, 1986, 1987] به منظور بررسی و ارزیابی رفتار عمل شاخه‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای و یکنواخت و همچنین ارایه دستورالعملها و توصیه‌هایی برای طراحی سازوکار رفتاری، عمل شاخه‌ای را به‌طور تجربی و تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. سروشیان و همکاران [Soroushian et al., 1987, 1988] رفتار عمل شاخه‌ای میلگردها در مقابل پوشش و هسته اعضای بتنی و همچنین ارزیابی رفتار چرخه‌ای آنها را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی از انجام برنامه آزمایشگاهی آنها شبیه سازی رفتار اتصالات تیر- ستون به صورت تجربی بوده است. همچنین دی پولی و همکاران [Dei Poli et al., 1992] برای ارایه رابطه‌ای برای بیان رابطه نیرو- تغییر مکان شاخه‌ای، تعدادی آزمایش بر روی نمونه‌های به شکل بلوک انجام دادند.

و در و همکاران [Dere et al. 2006] دنبال شده است. ویلیام و شکری [William and Shoukry, 2001] با بکارگیری المانهای Solid هشت گرهی، میلگردهای عبوری را شبیه سازی کرده‌اند.

شکری و همکاران [Shoukry et al., 2007] نیز با بکارگیری مدل سازی سه بعدی به روش اجزاء محدود، ساز و کار انتقال نیرو را در روسازیهای بتنی تحت بارهای دینامیکی شبیه سازی کردند. در این مطالعه اندرکنش و تاثیر همزمان گرادیان و تغییرات غیرخطی دما در میزان باربری روسازیهای بتنی نیز در مدل سازی در نظر گرفته شد. وادکار و همکاران [Wadkar et al., 2011] میزان کارایی و قابلیت روسازی فرودگاه را با استفاده از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود تحت بارهای دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. با تعریف پارامتر قابلیت باربری (LTE) و استخراج مقادیر متناظر بر اساس نتایج حاصل از تحلیل، ساز و کار انتقال نیرو (بار) در روسازیه‌ها به صورت کیفی و کمی تحت بارگذاریهای استاتیکی و دینامیکی تعیین شد.

حسینی و پاژنگ [Hassani and Pajang, 2006] کارایی و ساز و کار انتقال بار توسط میله‌های GFRP، میله‌های فولادی بدون پوشش اپوکسی و همچنین با پوشش اپوکسی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. هدف از این آزمایش وارد کردن بار محوری خالص به میله داوول و مشاهده نحوه لغزش میله‌های داوول از داخل بتن بوده است در هنگامی که چسبندگی بین داوول و بتن به طور کامل از بین می‌رود. نتایج نشان می‌دهد که به دلیل یکسان بودن ضریب ارتجاعی GFRP و بتن، تنش جزیی در سطح مشترک این دو نوع مصالح ایجاد می‌شود، در نتیجه پدیده خستگی و ترکهای ناشی از خستگی به وقوع نخواهد پیوست.

اگر چه به نظر می‌رسد مدل سازی کل روسازی به همراه میلگردهای عبوری و بستر موجب افزایش دقت در نتایج می‌شود، اما این رویکرد حجم محاسبات را افزایش داده و از طرفی مقیاس مدل سازی را محدود به نمونه‌های کوچک مقیاس می‌کند. دشواری در مدل سازی، کالیبره کردن مدل‌های رفتاری میلگرد، بتن محصور

اعمالی پیش بینی شده که در حقیقت وجه تمایز این مدل با سایر مدل‌های مرتبط است. مقاومت شاخه‌ای با فرض رفتار میلگرد به عنوان یک عضو خمشی که قادر به انتقال خمش، برش و نیروی محوری است به دست می‌آید.

سلطانی محمدی و مائکاوا [Soltani and Maekawa, 2008] مدل ارائه شده توسط مائکاوا و قریشی را برای بارگذاری سه محوره و چرخه‌ای توسعه دادند. مدل ایشان مبتنی بر یک روش ریزمدل است که در آن وابستگی پاسخ به سابقه و مسیر بارگذاری در گام‌های مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ماناوا و همکاران [Mannava et al., 1999] تاثیر مقاومت بتن، قطر میلگرد (ساده) و عرض اتصال را در نحوه میزان انتقال نیرو و نحوه تغییر مکان میلگردهای عبوری در روسازیه‌ها به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. بسیاری از پژوهشگران به منظور شبیه سازی انتقال نیرو در روسازیه‌ها از روش اجزاء محدود (FEM) و در قالب نرم افزارهای جامع موجود (مانند ANSYS و ABAQUS) استفاده کرده و برخی دیگر اقدام به ارائه المانهای تیر-ستونی مناسب جهت مدل سازی میلگردهای عبوری کرده‌اند. در مطالعات اولیه در این چارچوب (FEM) میلگردهای عبوری با استفاده از المانهای فزنی با رفتار ارتجاعی خطی شبیه سازی شده‌اند [Huang and Wang, 1973, Tia et al., 1987]. سپس طباطبایی و بارنبرگ [Tabatabaie and Barenberg, 1980] و محبوب و همکاران [Mahboub et al., 2004] با فرض رفتار غیر خطی برای فنرها، این روش را توسعه دادند.

برای شبیه سازی دقیق‌تر رفتار میلگردهای عبوری چاناکشاوا و همکاران [Channakeshava et al., 1993] از المانهای تیر-ستونی سه بعدی استفاده کردند و همچنین اندرکنش میلگرد و بتن محصور کننده را در نظر گرفتند. به طور کلی این رویکرد (استفاده از المانهای تیر-ستونی سه بعدی) توسط بسیاری از دیگر پژوهشگران مانند باتاچاریا [Bhattacharya, 2000]، نیشیزاوا و همکاران [Nishizawa et al., 2001]، دیویدز [Davids, 2000]، مایترا و همکاران [Maitra et al., 2009]

معمولا در محدوده ارتجاعی بوده و با افزایش بارگذاری یا میزان تغییر مکانهای اعمالی، ترکها در بتن محصورکننده شکل می‌گیرند. با رشد و شکل‌گیری ترکها در بتن محصورکننده، بستر میلگرد به‌گونه‌ای تدریجی حذف شده و در نتیجه موجب افزایش تنشهای مقطع میلگرد و نهایتا تسلیم آن می‌شود. به همین علت بسیاری از مدل‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی رفتار میلگردهای شاخه‌ای بر پایه تئوری تیر بر بستر ارتجاعی هستند. در مدل‌های اولیه فرض رفتار ارتجاعی بر بتن و میلگرد حاکم بوده، اما برای افزایش دامنه کاربرد و دقت مدلها، این رفتار به محدوده غیر ارتجاعی گسترش یافته است. سهولت تئوری تیر بر بستر ارتجاعی در استخراج روابط و همچنین بکارگیری آنها، محدوده کاربرد آنها را در این گونه مسائل، بسیار گسترده کرده است. همچنین با استفاده از رابطه‌ای مناسب برای سختی بستر، می‌توان با دقتی مناسب و قابل قبول رفتار کلی و واقعی این سازوکار را شبیه‌سازی کرد. در حقیقت پارامتر سختی بستر مهم‌ترین عامل در ارتقاء مدل تیر بر بستر ارتجاعی، به مدل تیر بر بستر غیر ارتجاعی بوده که در این مقاله به آن پرداخته شده است. به این منظور سعی شده روابط مربوط، به گونه‌ای تنظیم شوند که به راحتی بتوان آنها را برای هرحالتی کالیبره کرد.

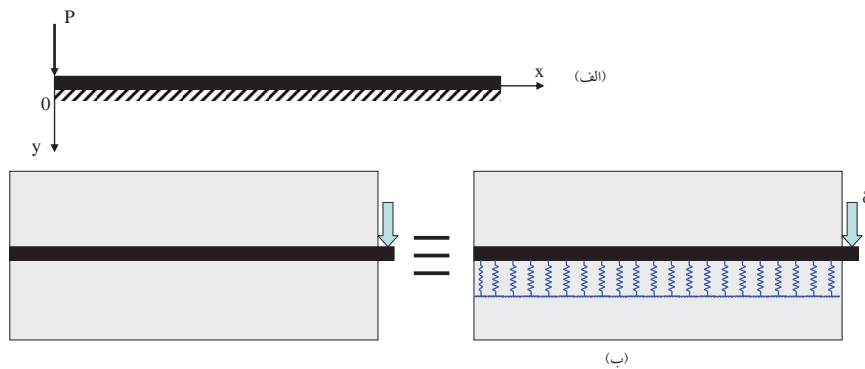
در تئوری تیر بر بستر ارتجاعی، فرض می‌شود که رفتار تیر و بستر به صورت ارتجاعی بوده و همچنین میزان نیروی وارده از طرف بستر به تیر با میزان تغییر مکان تیر به طور مستقیم مرتبط بوده و همچنین طول تیر و تعداد فنرها نامحدود است. در برخی مسائل مرتبط دیگر نیز فرض شده که تیر به صورت نیمه بی‌نهایت بر روی بستر ارتجاعی متکی است (شکل الف). هتتی [Hete-nyí, 1958] برای رفتار خطی تیر و بستر ارتجاعی روابط مربوط به نحوه تغییرات تغییر مکان، دوران، لنگر و برش در طول تیر را ارائه کرده است. با شبیه‌سازی و معادل‌سازی میلگرد عبوری و بستر بتنی با مساله تیر متکی بر یک بستر روابط مرتبط با سازوکار شاخه‌ای قابل استخراج است (شکل اب). در این شبیه‌سازی، بتن بستر با فنرهای بستر و همچنین میلگرد عبوری با تیر معادل می‌شود.

کننده و بستر با توجه به تعداد نسبتا زیاد پارامترهای مرتبط از یک سو و از سوی دیگر زمان انجام تحلیل، در مجموع موجب افزایش زمان مدل‌سازی و ثبت نتایج خروجی می‌شوند.

در تحقیق حاضر، برای شبیه‌سازی سازوکار انتقال تنش از سطوح تماسی در روسازیهای بتنی، از بسط تئوری تیر بر بستر ارتجاعی (BEF) استفاده شده است. میلگرد عبوری در داخل روسازی و خود روسازی به عنوان تیر و بتن محصورکننده میلگرد عبوری و خاک بستر روسازی به عنوان فنرهای بستر در این مدل در نظر گرفته شده‌اند. از این مدل در دو سطح، یکی برای میلگرد عبوری و دیگری برای بستر روسازی، استفاده شده است. معمولا رفتار بستر بتنی (فنرهای بستر میلگرد عبوری) در مراحل اولیه بارگذاری (تغییر مکانهای اعمالی کوچک) به صورت ارتجاعی خطی است، اما با افزایش اعمال بارگذاری، در بستر بتنی ترکها شکل می‌گیرند. به همین جهت، تئوری تیر بر بستر ارتجاعی از دقت مناسبی در بیان تغییر شکلها و نیروهای داخلی برخوردار نیست. بنابراین برای تعمیم این مدل به مدل تیر بر بستر غیر ارتجاعی، رابطه‌ای مناسب برای فنرهای بستر میلگرد پیشنهاد شده است. این رابطه بر اساس مشخصات بتن بستر و میلگرد عبوری تعیین می‌شود. حذف تدریجی بستر بتنی میلگردهای عبوری که ناشی از اندرکنش غیرخطی بتن و میلگرد است، با توجه به مشخصات بتن و میلگرد در الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود. سهولت در کالیبراسیون مدل رفتاری فنرها و همچنین بکارگیری مناسب تئوری تیر بر بستر ارتجاعی فوق، موجب کاهش چشمگیر زمان تحلیل و مدل‌سازی شده است.

## ۲. سازوکار شاخه‌ای

سازوکار شاخه‌ای یکی از سازوکارهای اصلی در انتقال تنش (نیرو) از سطوح ترک خورده و تماسی و همچنین تنها عامل مقاوم و انتقالی در درزهای سازه‌های پیش‌ساخته است. تنشهای وارد شده در این سطوح از طریق میلگردهای عبوری به بتن منتقل می‌شوند. در واقع بتن نقش عاملی محصورکننده را برای میلگرد دارد. میلگرد و بتن محصورکننده در مراحل اولیه بارگذاری،



شکل ۱. مدل سازی عمل شاخه‌ای با مدل تیر بر بستر ارتجاعی، (الف) تیر نیمه بی نهایت بر بستر ارتجاعی، (ب) معادل سازی سازوکار شاخه‌ای با مدل تیر بر بستر ارتجاعی

محدوده ارتجاعی و غیر ارتجاعی و همچنین استخراج رابطه‌ای مناسب برای سختی فنرهای بستر میلگرد ( $k_p$ )، مقدار برش حاصله از رابطه (۴) با مدل ارائه شده توسط سلطانی محمدی و مائکاوا معادل قرار داده می‌شود. لازم به یادآوری است که مدل سلطانی محمدی و مائکاوا و همچنین مدل مائکاوا و قریشی [Maekawa and Qureshi, 1996]، مدلهایی هستند که رابطه بار- تغییر مکان شاخه‌ای را با حل معادلات غیرخطی تعادل و سازگاری تغییر مکانها به صورت عددی و در هر گام بارگذاری تعیین می‌کنند. به بیان دیگر، این دو مدل، صریحا رابطه‌ای به فرم بسته<sup>۴</sup> برای تعیین رابطه بار- تغییر مکان (پوش منحنی بار- تغییر مکان) ارائه نمی‌کنند، اما از آنجا که روابط موجود در تئوری تیر بر بستر ارتجاعی، دارای فرمی مشخص و صریح هستند، بنابراین بایستی برای معادل سازی (جهت تعیین رابطه‌ای برای سختی بستر)، رابطه‌ای صریح و بسته در اختیار داشت. بنابراین برای این منظور سعی شده تا فرمی صریح (بسته) و درعین حال ساده شده برای مدل سلطانی محمدی و مائکاوا ارائه شود تا رابطه مورد نظر برای سختی الاستوپلاستیک بستر حاصل شود.

مدل سلطانی محمدی و مائکاوا به جهت در نظر گرفتن وابستگی پاسخ به سابقه و مسیر بارگذاری در گامهای مختلف و همچنین در نظر گرفتن همزمانی اثرات بارگذاری در راستاهای گوناگون، از دقت قابل قبولی در شبیه سازی رفتار واقعی انتقال تنش توسط میلگرد در سطوح ترک خورده و تماسی برخوردار است. در این مدل، میلگرد عبوری به عنوان یک محیط سه بعدی در نظر گرفته

هتنی روابط زیر را برای بیان تغییرات تغییر مکان، دوران، لنگر و برش در طول تیر (نیمه بی نهایت) متکی بر بستر ارتجاعی ارائه کرده است.

$$y(x) = \frac{2F\lambda}{k} D_{\lambda x} \quad (1)$$

$$\theta(x) = -\frac{2F\lambda^2}{k} A_{\lambda x} \quad (2)$$

$$M(x) = -\frac{F}{\lambda} B_{\lambda x} \quad (3)$$

$$V(x) = -F.C_{\lambda x} \quad (4)$$

$$A_{\lambda x} = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x)$$

$$B_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cdot \sin \lambda x$$

$$C_{\lambda x} = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x)$$

$$D_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cdot \cos \lambda x \quad (5)$$

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{k_b}{4E_s \cdot I_b}} \quad (6)$$

در روابط فوق  $y(x), \theta(x), M(x), V(x)$  به ترتیب تغییرات برش، لنگر، دوران و تغییر مکان در طول تیر (با فرض رفتار خطی)،  $k_p$  معرف سختی فنرهای بستر و  $E_s, I_b$  نیز به ترتیب ممان اینرسی و مدول ارتجاعی میلگرد هستند. چنان که مشاهده می‌شود برش در  $x=0$ ، بیشینه مقدار خود را داشته و میزان لنگر نیز در این نقطه صفر است. محدوده کاربرد این رابطه تنها محدود به وضعیت ارتجاعی است. با افزایش بارگذاری فنرها وارد محدوده غیر ارتجاعی شده و موجب حذف تدریجی بستر بتنی می‌شوند. در تحقیق حاضر برای تعیین نحوه رفتار فنرها در



$$L_{c0} = \frac{3\pi}{4} \sqrt[4]{\frac{4E_s I_b}{k_{fc} \cdot d_b}} \quad (9)$$

$$k_{fc} = \frac{150f_c^{0.85}}{d_b} \quad (10)$$

$$DI = \frac{\delta_b}{d_b} \quad (11)$$

$$L_c = L_{c0} \quad \text{for } DI \leq 0.02$$

$$L_c = L_{c0} [1 + 3(DI - 0.02)^{0.8}] \quad \text{for } DI > 0 \quad (12)$$

$k_{fc}$  سختی بستر و  $DI$  اندیس خرابی (بدون بعد) در مدل پیشنهادی مائکاوا و قریشی است. در روابط فوق  $d_b$  و  $f'_c$  به ترتیب قطر میلگرد و مقاومت فشاری بتن است. با معلوم بودن تغییرات انحناء در طول میلگرد و در حین بارگذاری می‌توان تغییرات کرنش در مقطع میلگرد را نیز محاسبه کرد. میزان کرنش میلگرد براساس تئوری خمش تیرها و با توجه به میزان انحناء میلگرد در هر نقطه از طول آن ( $0 \leq x \leq \frac{L_c}{2}$ ) به صورت زیر خواهد شد:

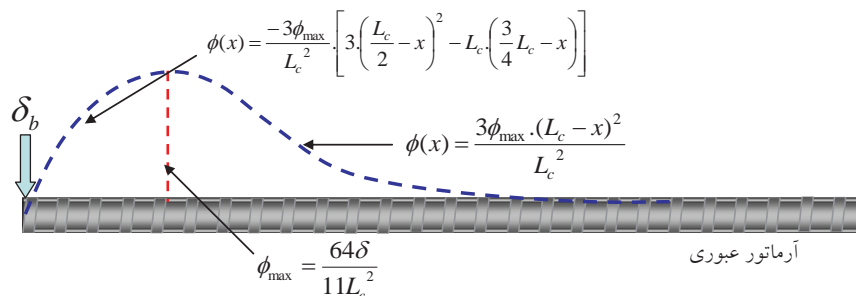
$$\varepsilon(x) = \phi(x) \cdot y = \frac{192 \cdot \delta_b \cdot x \cdot (2L_c - 3x)y}{11 \cdot L_c^4} \quad (13)$$

در رابطه فوق فاصله هر جزء سطح مقطع میلگرد از تار ختنی است. با فرض رفتار خطی میلگرد و بارگذاری برشی نیز می‌توان تغییرات تنش میلگرد را نیز تعیین کرد.

$$\sigma(x) = \varepsilon(x) \cdot E_s = \frac{192 \cdot \delta_b \cdot x \cdot (2L_c - 3x)y}{11 \cdot L_c^4} \cdot E_s \quad (14)$$

با معلوم بودن تنش میلگرد نیز تغییرات لنگر و برش میلگرد با انتگرال گیری روی سطح مقطع به دست می‌آید.

$$M(x) = 2 \int_0^{\frac{d_b}{2}} (\sigma(x) \cdot y \cdot \sqrt{d_b^2 - 4y^2}) dy = \frac{3\pi \cdot d_b^4 \cdot E_s \cdot \delta_b \cdot x \cdot (2L_c - 3x)}{11 \cdot L_c^4} \quad (15)$$



شکل ۲. تابع ارایه شده برای تعیین شکل پروفیل انحناء میلگرد در ناحیه تاثیر انحناء°

شده که علاوه بر تحمل برش می‌تواند اثرات همزمانی برش و کشش محوری را نیز شبیه سازی کند. فرضیات و رویکرد اصلی این مدل بر اساس تئوری تیر بر بستر ارتجاعی (BEF) و مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط قریشی و مائکاوا، بهبود یافته است.

همانند مدل مائکاوا و قریشی، از رابطه (۷) برای بیان تغییرات انحناء در میلگرد عبوری استفاده می‌شود (شکل ۲). اما از آنجا که برش ناشی از عمل شاخه‌ای در  $x=0$  محاسبه می‌شود، بنابراین محدوده تابع ارایه شده برای انحناء، فقط در محدوده  $0 \leq x \leq \frac{L_c}{2}$  مد نظر قرار می‌گیرد (شکل ۲).

تابع نمایش داده شده در شکل (۲) معرف نحوه تغییرات انحناء در طول میلگرد در حین بارگذاری، مطابق با فرضیات مائکاوا و قریشی [Maekawa and Qureshi, 1996] است. در ابتدا فرض می‌شود که بارگذاری صرفاً برشی بوده و همچنین رفتار میلگرد، خطی است.

$$\phi(x) = -\frac{3\phi_{\max}}{L_c^2} \left[ 3 \left( \frac{L_c}{2} - x \right)^2 - L_c \left( \frac{3}{4} L_c - x \right) \right] \quad (7)$$

$$\text{for } 0 \leq x \leq \frac{L_c}{2}$$

$$\phi_{\max} = \frac{64 \delta_b}{11 L_c^2} \quad (8)$$

در روابط فوق  $\delta_b$  تغییر مکان برشی اعمالی و نیز مطابق [So - tani and Maekawa, 2008] بیانگر طول ناحیه تاثیر انحناء است. این ناحیه محدوده‌ای را تعیین می‌کند که میلگرد تحت تاثیر بار اعمالی واقع می‌شود.  $L_c$  براساس پارامتر  $L_c$  و همچنین پارامتر دیگری به نام اندیس خرابی ( $DI$ ) تعیین می‌شود. در واقع در ابتدا طول ناحیه تاثیر انحناء همان  $L_c$  بوده که با افزایش بارگذاری (اعمال تغییر مکان)، مقدار آن به  $(L_c)$  افزایش می‌یابد.

فشردهای بستر را با توجه به میزان بار اعمالی، مقاومت فشاری بتن، مشخصات مکانیکی و قطر میلگرد معین می‌کند و پارامتر DI حد ارتجاعی و غیر ارتجاعی را برای سختی فنرها مشخص می‌کند.

### ۳. سازوکار انتقال نیرو در روسازیهای بتنی

انتقال نیروهای وارده به سطح بزرگراهها و مسیرهای اصلی، از طریق روسازیها و اتصالاتهای مرتبط به بستر منتقل می‌شود. نقش روسازیها در عمر مفید بزرگراهها و شریانهای حیاتی حائز اهمیت است و بنابراین شناخت و بکارگیری ابزار مناسب جهت تحلیل و طراحی، می‌تواند در میزان کارایی و دوام مسیرهای انتقالی بسیار موثر باشد. به طور کلی، خاک بستر و میلگردهای عبوری دو عامل مقاوم در برابر بارگذاریهای اعمالی هستند. در صورتی که بستر حذف شود، سازوکار انتقال نیروها کاملاً مشابه سازوکار شاخه‌ای بوده که قبلاً تشریح شده است. اما با وجود بستر روسازی، مشارکت میلگرد و بستر، با توجه به مشخصه‌های مکانیکی میلگرد و خاک می‌تواند متغیر باشد. هدف، ارایه الگوریتمی مناسب برای تعیین رابطه بار- تغییر مکان کلی ( $P - \delta$ ) مجموعه روسازی (شامل بستر و میلگردهای عبوری)، با بکارگیری تئوری تیر بر بستر ارتجاعی است.

در شکل (۳ الف و ب) هندسه اولیه و تغییر شکل یافته دو روسازی بتنی مجاور که به وسیله میلگرد به یکدیگر متصل شده‌اند نمایش داده شده‌اند. جابجایی به روسازی سمت چپ به میزان  $\delta$  در محل اتصال (A) اعمال می‌شود. همان طور که از شکل (۳ ب) مشخص است، میلگردهای عبوری موجب انتقال نیرو از روسازی چپ به روسازی راست می‌شوند. یعنی فرض می‌شود که تغییر مکان روسازی و تغییر مکان شاخه‌ای میلگرد در B به ترتیب برابر با  $\delta_{dr}$ ،  $\delta_r$  و تغییر مکان بستر نیز  $\delta_{sr}$  است. مجهولات مساله فوق  $\delta_{dr}$ ،  $\delta_r$ ،  $\delta_{sl}$ ،  $\delta_{dl}$  بوده در حالی که ورودی تنها است.

در شکل (۳ ج) نیروهای مقاوم در روسازی چپ در برابر بارگذاری مشخص شده‌اند. همان طور که نشان داده شده است، اعمال تغییر مکانی به میزان  $\delta$  در جهت  $Y$ - موجب ایجاد تغییر

$$V(x) = \frac{d}{dx}(M(x)) = \frac{6\pi}{11} \cdot \frac{d_b^4 \cdot E_s \cdot \delta_b \cdot (L_c - 3x)}{L_c^4} \quad (16)$$

و در انتها مقاومت شاخه‌ای مطابق رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$V_d = V(x=0) = \frac{6\pi}{11} \cdot \frac{d_b^4 \cdot E_s \cdot \delta_b}{L_c^3} = \frac{384}{11} \cdot \frac{E_s \cdot I_b \cdot \delta_b}{L_c^3} \quad (17)$$

رابطه (۱۷)، مقاومت شاخه‌ای را با فرض رفتار خطی میلگرد تحت برش خالص بیان می‌کند. در این رابطه، برش شاخه‌ای،  $V_d$ ، با ممان اینرسی و مدول الاستیسیته، نسبت مستقیم، و با مکعب طول ناحیه انحناء، رابطه عکس دارد. از آنجا که رفتار میلگرد در ابتدا خطی فرض شده، بنابراین برش شاخه‌ای، مستقل از مقاومت (تنش) جاری شدن میلگرد ( $f_y$ ) است. اما نکته حائز اهمیت در این خصوص آن است که در برش خالص و همچنین برای میلگردهای با مقاومت جاری شدن بیش از ۳۰۰ مگاپاسکال، مقاومت شاخه‌ای، مستقل از تنش تسلیم خواهد بود (بر اساس نتایج حاصل از مطالعه پارامتری مدل سلطانی محمدی و مائکاوا)، یعنی تنش میلگرد در حین بارگذاری کمتر از تنش تسلیم بوده و در نتیجه لزومی به در نظر گرفتن آن در شرایط مذکور نیست. اکنون که فرم صریح و بسته مدل سلطانی محمدی و مائکاوا تحت بارگذاری یکنوا حاصل شده است، می‌توان با معادل سازی رابطه برش در تئوری تیر بر بستر ارتجاعی (رابطه ۴) با رابطه متناظر حاصله از مدل مذکور (رابطه ۱۷)، نحوه تغییرات سختی بستر را تعیین کرد.

$$V|_{BEF} = V_d|_{Soltani \& Maekawa} \quad (18)$$

$$x=0 \rightarrow D_{\lambda x} = C_{\lambda x} = 1, F = \frac{\delta_d \cdot k_b}{2\lambda} \quad (19)$$

$$\frac{384}{11} \cdot \frac{E_s \cdot I_b \cdot \delta_b}{L_c^3} = \frac{\delta_b \cdot k_b}{2\lambda} \quad (20)$$

و پس از ساده سازی خواهیم داشت:

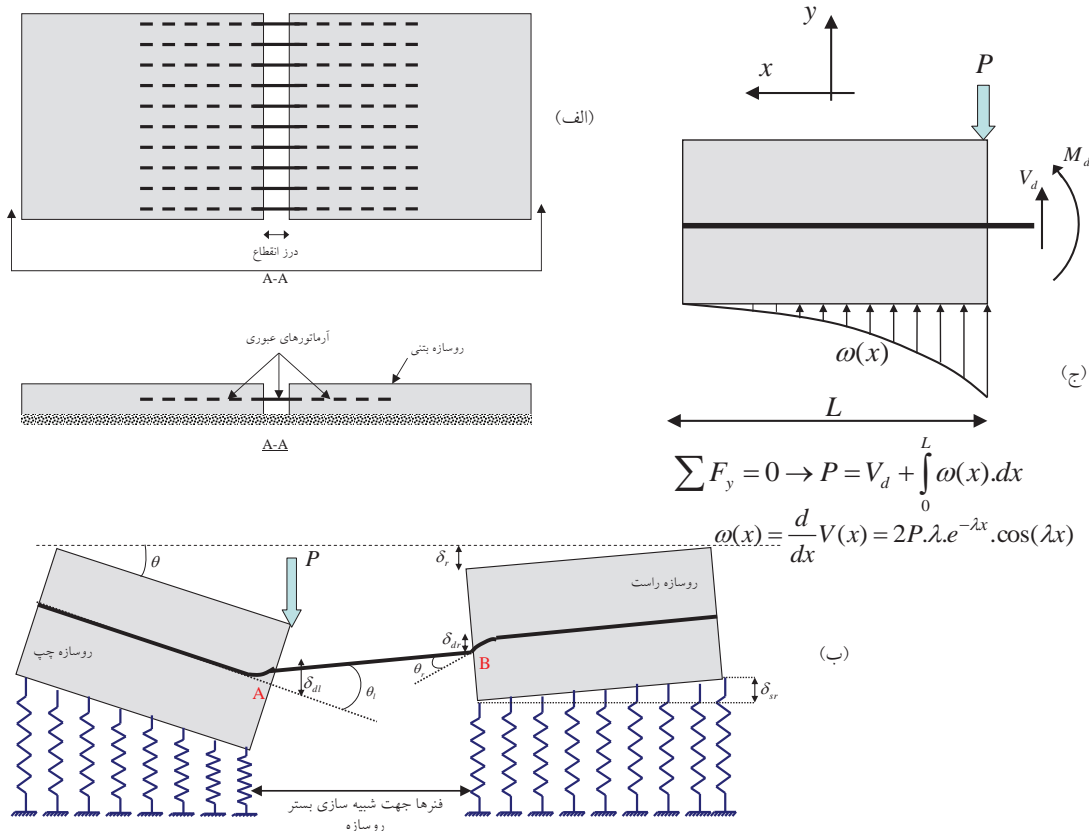
$$k_b = 181 \frac{E_s \cdot I_b}{L_c^4} \quad (21)$$

سختی فنرهای بستر با استفاده از رابطه (۲۱) در هر گام بارگذاری محاسبه شده و در رابطه (۴) قرار گرفته تا میزان مقاومت شاخه‌ای محاسبه شود. مقدار پارامتر  $I_b$  نیز مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. به بیان دیگر رابطه (۲۱) محدوده الاستوپلاستیک سختی

$\delta_{dl}$  مکانی به اندازه  $\delta_{dl}$  در راستای  $y$  خواهد شد. بنابراین اختلاف این دو مقدار همان  $\delta_{sl}$  (تغییر مکان بستر) خواهد بود. همچنین اختلاف بین  $\delta_{dr}$  (تغییر مکان شاخه‌ای میلگرد در نقطه B) و  $\delta_r$  برابر  $\delta_{sr}$ ، تغییر مکان بستر واقع در زیر روسازی سمت راست است. توضیح آنکه تغییر مکان بستر، خود نیز وابسته به تغییر مکان شاخه‌ای میلگرد عبوری است. همچنین فرض می‌شود که شیب میلگرد در A و B به ترتیب برابر با  $\theta_1$  و  $\theta_r$  و دوران سمت چپ روسازی به اندازه  $\theta$  است. شکل (۳) نشان می‌دهد که در ابتدا میلگرد به اندازه  $\theta$  در جهت عقربه‌های ساعت دوران کرده و سپس در A به دلیل اتصال با روسازی سمت راست به میزان  $\theta_1$  در خلاف عقربه‌های ساعت دوران کرده است. بنابراین دوران خالص ( $\Delta\theta$ ) در نقطه A برابر با اختلاف  $\theta$  و  $\theta_1$  است. پس با داشتن زاویه بین میلگرد عبوری و افق ( $\Delta\theta$ ) در A و همچنین فاصله بین دو روسازی مجاور (l) نیز می‌توان  $\delta_r$  را از روی  $\delta$ ،

سازگاری تغییر شکلها و  $\delta_{dl}$  به دست آورد. در این پژوهش برای حل این مساله با استفاده از فرضیات فوق، از الگوریتم مبتنی بر روش تکرار<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. روال چنین است که در ابتدا  $\delta$  به عنوان اعمال جابجایی معلوم بوده و طبیعتاً مشخصات هندسی و مصالح نیز معلوم اند. برای هر گام بارگذاری و برای اولین تکرار<sup>۷</sup> مقداری متناسب با  $\delta$  برای  $\delta_{dl}$  فرض شده و با سازگاری تغییر شکلها  $\delta_r$ ،  $\delta_{sr}$  و  $\delta_{sl}$  به دست می‌آیند. سپس رابطه تعادل در راستای قائم کنترل می‌شود. در صورتی که شرط تعادل در حد میزان خطای مجاز مطلوب باشد، مقدار فرض شده برای  $\delta_{dl}$  همان جواب خواهد بود، در غیر این صورت، این

مکانی به اندازه  $\delta_{dl}$  در راستای  $y$  خواهد شد. بنابراین اختلاف این دو مقدار همان  $\delta_{sl}$  (تغییر مکان بستر) خواهد بود. همچنین اختلاف بین  $\delta_{dr}$  (تغییر مکان شاخه‌ای میلگرد در نقطه B) و  $\delta_r$  برابر  $\delta_{sr}$ ، تغییر مکان بستر واقع در زیر روسازی سمت راست است. توضیح آنکه تغییر مکان بستر، خود نیز وابسته به تغییر مکان شاخه‌ای میلگرد عبوری است. همچنین فرض می‌شود که شیب میلگرد در A و B به ترتیب برابر با  $\theta_1$  و  $\theta_r$  و دوران سمت چپ روسازی به اندازه  $\theta$  است. شکل (۳) نشان می‌دهد که در ابتدا میلگرد به اندازه  $\theta$  در جهت عقربه‌های ساعت دوران کرده و سپس در A به دلیل اتصال با روسازی سمت راست به میزان  $\theta_1$  در خلاف عقربه‌های ساعت دوران کرده است. بنابراین دوران خالص ( $\Delta\theta$ ) در نقطه A برابر با اختلاف  $\theta$  و  $\theta_1$  است. پس با داشتن زاویه بین میلگرد عبوری و افق ( $\Delta\theta$ ) در A و همچنین فاصله بین دو روسازی مجاور (l) نیز می‌توان  $\delta_r$  را از روی  $\delta$ ،



شکل ۳. نحوه انتقال نیرو و تغییر شکلها در روسازیهای بتنی، الف) هندسه و شمای کلی روسازی بتنی به همراه نحوه اتصال آنها، ب) فرم تغییر شکل یافته روسازی تحت بارگذاری اعمالی، ج) نیروهای انتقالی و مقاوم در برابر بارگذاری



کارآیی و دقت الگوریتم پیشنهادی برای روسازی بتنی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱ اعتبارسنجی سازوکار شاخه‌ای

در مدل حاضر مقدار برش شاخه‌ای با استفاده از رابطه (۴) تعیین می‌شود. در این رابطه پارامترهای  $F, k_b, \lambda$  به ترتیب بر اساس روابط (۱۹)، (۲۱) و (۶) محاسبه می‌شود. همچنین پروفیل‌های تغییر مکان، دوران و لنگر نیز طبق روابط (۱) تا (۳) قابل محاسبه‌اند.

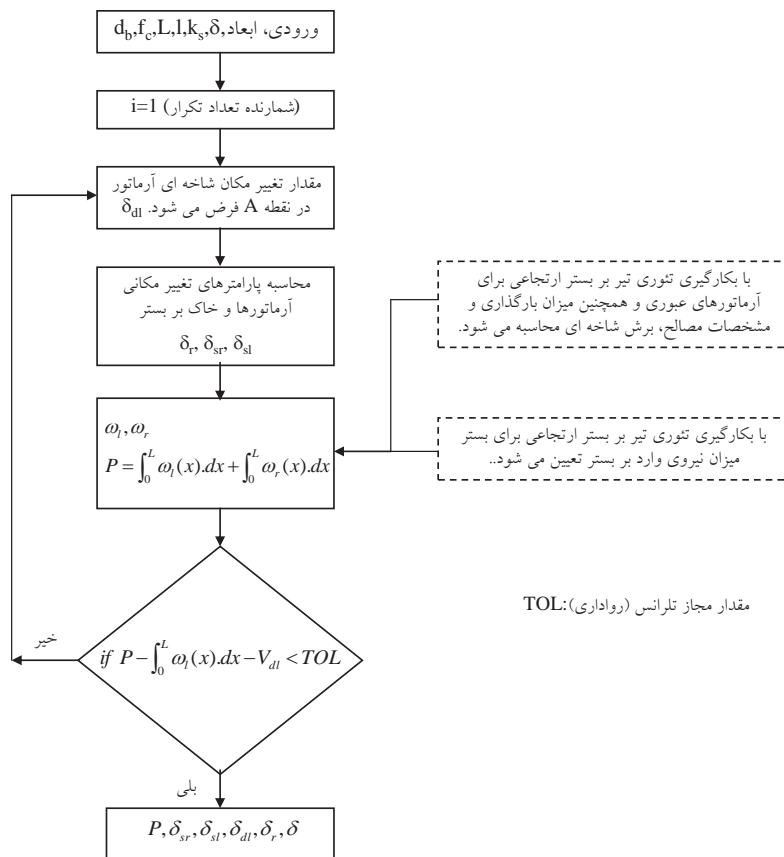
در ابتدا، اعتبار سنجی سازوکار شاخه‌ای صورت گرفته که نتایج حاصل از مدل با داده‌های آزمایشگاهی در قالب نمودارهای بار- تغییر مکان شاخه‌ای مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در واقع، دقت مدل ارایه شده در تخمین سختی و مقاومت نشان داده می‌شود. در شکل (۵ الف و ب) نتایج مدل با داده‌های حاصل از

روند تا ارضاء شرط تعادل تکرار می‌شود. با حصول اطمینان از کنترل شرط تعادل مقادیر  $\delta, \delta_r, \delta_{dl}, \delta_{sl}, \delta_{sr}$  و  $P$  (بارگذاری متناظر) محاسبه می‌شود.

شکل (۳) بیانگر واکنش بستر در طول روسازی است که با مشتق‌گیری از برش محاسبه می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود، بستر بتنی میلگردهای عبوری و همچنین بستر روسازیها به کمک تئوری تیر بر بستر ارتجاعی (فترهای معادل) شبیه سازی و روابط مربوطه و نیز الگوریتم پیشنهادی (شکل ۴) ارایه شده است.

#### ۴. اعتبارسنجی

اعتبارسنجی مدل‌های ارایه شده در دو قسمت جداگانه برای سازوکار شاخه‌ای و همچنین روسازیهای بتنی صورت می‌پذیرد. در ابتدا رابطه ارایه شده جهت تعیین بار- تغییر مکان شاخه‌ای (رابطه ۴) را با نتایج آزمایشگاهی متناظر مقایسه کرده و سپس



شکل ۴. الگوریتم پیشنهادی برای تعیین رابطه بار- جابجایی روسازی در هر گام از بارگذاری اعمالی

را نشان داده است. سختی اولیه و مقاومت شاخه‌ای مدل تطابق مناسبی با نتایج متناظر آزمایشگاهی داشته که نشان از جامعیت آن دارد. نکته حائز اهمیت در این خصوص سهولت در بکارگیری، کالیبراسیون و همچنین کاهش چشمگیر حجم محاسبات است.

#### ۴-۲ اعتبارسنجی سازوکار انتقال نیرو در روسازیهای بتنی

کیتون و بیشاپ<sup>۱</sup> [Maitra et al., 2009] به صورت آزمایشگاهی عملکرد انتقال نیرو در روسازیهای بتنی را مورد مطالعه قرار دادند. نمونه مورد آزمایش متشکل از دو روسازی است که توسط ۱۵ میلگرد عرضی (شاخه‌ای) به یکدیگر متصل شده که فاصله آنها از یکدیگر ۳۰۴/۸ میلیمتر است. به فاصله ۳/۸۱ متر از درز انقطاع، صفحه‌ای ضعیف تعبیه شده و ابعاد هر کدام از روسازیه‌ها به ترتیب طول، عرض و ارتفاع (۷۶۲۰، ۴۵۷۰ و ۲۵۴) میلیمتر است. بارگذاری به میزان ۲۲۲/۴ کیلونیوتن به روسازی سمت چپ و در وسط آن در سطحی به اندازه (۴۰۶/۴ در ۳۹۶/۲۴) میلیمتر وارد شده تا وضعیت اعمال نیرو از طریق چرخ خودرو را شبیه سازی کند. سختی بستر  $k_s = 54.3 \times 10^{-3} N/mm^3$ ، قطر میلگردهای عبوری ۲۸/۶ میلیمتر و طول هر کدام ۵۰۸ میلیمتر است (شکل ۶). در این آزمایش در زیر نقطه اثر اعمال نیرو میزان تغییر مکان میلگرد عبوری محاسبه شده و همچنین پروفیل تغییرات برش و لنگر خمشی در طول میلگرد استخراج ( $\delta = 1mm$ ) شده است.

مطالعه آزمایشگاهی دی پولی و همکاران برای سه قطر گوناگون میلگرد و همچنین مقاومتهای فشاری مختلف رسم شده است. در شکل (۵ ج) نیز نتایج مطالعه آزمایشگاهی پائولی و همکاران [Paualy et al., 1974] نشان داده شده است. دی پولی و همکاران برای ارایه رابطه‌ای برای بیان رابطه نیرو- تغییر مکان شاخه‌ای تعدادی آزمایش بر روی نمونه‌های بلوکی شکل انجام دادند. بارگذاری به صورت یکنوا و مماس بر صفحه سطح تماسی اعمال شده است. آزمایشها در دو سری مختلف با مقاومتهای مختلف فشاری و قطرهای مختلف میلگرد صورت گرفته که نتایج در قالب نمودارهای بار- تغییر مکان شاخه‌ای ثبت شده است (شکل ۵ الف و ب). تنها یک میلگرد در مقطع نمونه‌ها در این برنامه آزمایشگاه در نظر گرفته شده است (شکل ۵). پائولی و همکاران، مطالعه آزمایشگاهی خود را با توجه به بررسی و ارزیابی سازوکار شاخه‌ای در اتصالات ساخت<sup>۲</sup> تنظیم کردند. در این آزمایش نمونه‌ها از دو قسمت تشکیل شده که به صورت قائم بر روی یکدیگر قرار دارند. عامل اصطکاک و تماسی بین این دو سطح حذف شده است. تعداد شش میلگرد از سطح تماسی در نمونه‌ها عبور کرده که عامل انتقال برش نیز هستند (شکل ۵). لازم به یادآوری است که نمودارهای ثبت شده در آزمایش پائولی و همکاران بر اساس مشارکت تنها یک میلگرد در برش است. شکل (۵) به لحاظ کیفی و کمی کارایی و دقت مدل ارایه شده

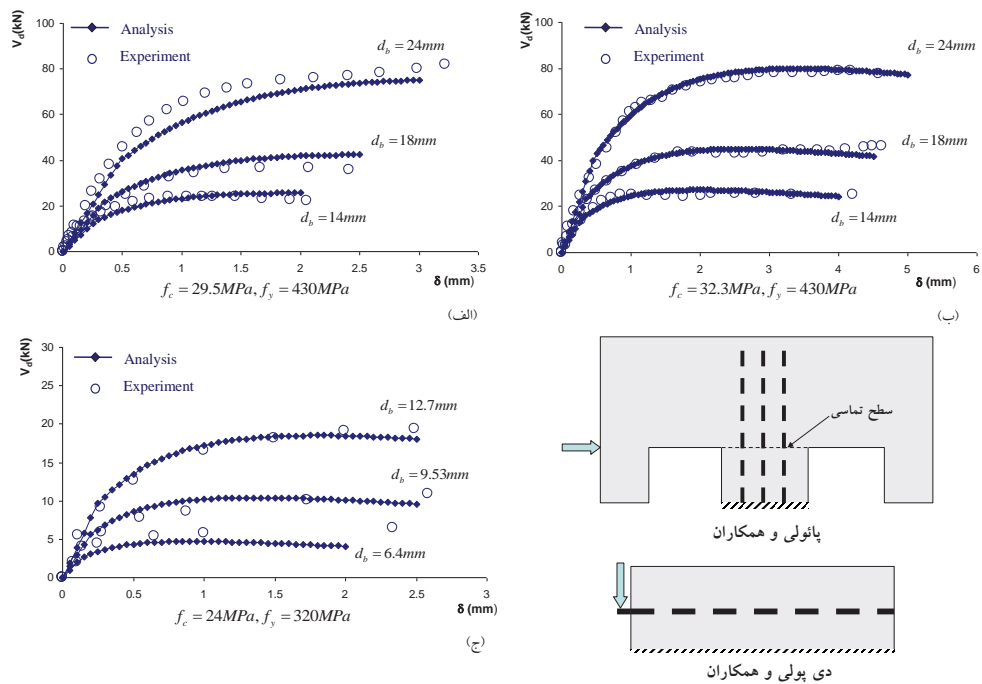
جدول ۱. مشخصات روسازی کیتون و بیشاپ [Maitra et al., 2009]

نیروی اعمالی (کیلو نیوتن)	تغییر مکان اعمالی میلگرد مرکزی (میلیمتر)	قطر میلگرد (میلیمتر)	طول میلگرد (میلیمتر)	درز (میلیمتر)
۲۲۲/۴	۱	۲۸/۶	۵۰۸	۱۹

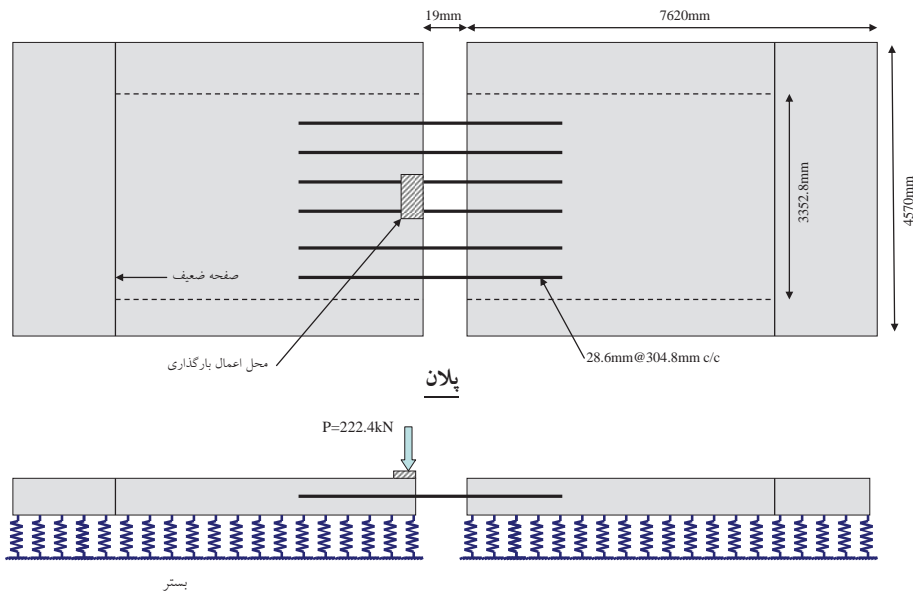
جدول ۲. مشخصات نمونه‌های ماناوا و همکاران [Mannava et al., 1999]

عنوان نمونه	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	قطر میلگرد (میلیمتر)	درز (میلیمتر)
MML	۴۰	۲۵/۴	۸/۹
LLH	۱۷/۹	۱۹	۲۰/۳
LML	۲۴/۱	۲۵/۴	۸/۹

شبیه سازی سازوکار انتقال برش در روسازیهای بتنی



شکل ۵. اعتبار سنجی مدل ارائه شده برای سازوکار شاخه‌ای با نتایج متناظر آزمایشگاهی، الف) مقایسه با مطالعه آزمایشگاهی دی پولی و همکاران، ب) داده‌های آزمایشگاهی دی پولی و همکاران، ج) پانولی و همکاران



شکل ۶. شمای کلی از مطالعه آزمایشگاهی کیتون و بیشاپ و نحوه اعمال بارگذاری

مشخصات مکانیکی کل نمونه، پروفیل برش محاسبه و رسم شده است. در این شکل نتایج حاصل از مطالعه عددی مایترا و همکاران و باتاچاریا [Bhattacharya, 2000] نیز نمایش داده شده است. مایترا و همکاران [Maitra et. al., 2009] با استفاده از نرم افزار جامع ANSYS و با مدل سازی روسازی (المانهای

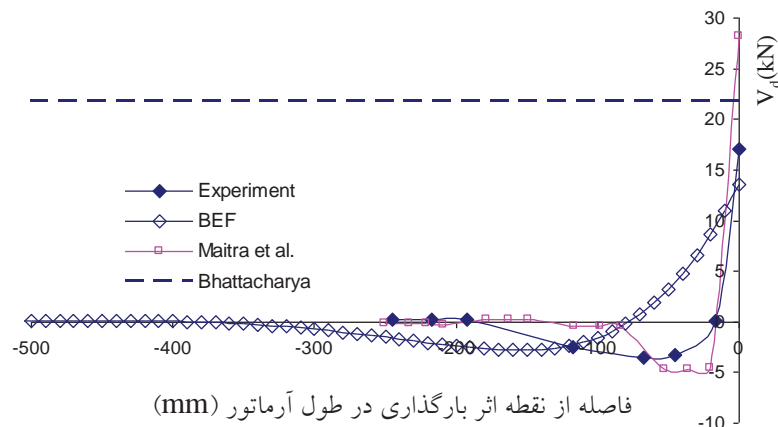
در شکل (۷) پروفیل تغییرات برش حاصل از مدل و آزمایش رسم شده است. میزان تغییر مکان ثبت شده برای میلگرد میانی در آزمایش و در وسط نمونه (زیر نقطه اثر نیرو) ( $\delta = 1mm$ ) ثبت شده است. این مقدار به عنوان بارگذاری تغییر مکانی (ورودی) در نظر گرفته شده و با توجه به قطر میلگرد و سایر

جهت نامگذاری نمونه‌ها استفاده کرده‌اند. در این مطالعه آزمایشگاهی، هر نمونه آزمایشگاهی با سه حرف شناخته و نامگذاری می‌شوند. حرف اول تا سوم به ترتیب معرف مقاومت فشاری بتن، قطر میلگرد عبوری و میزان عرض درز بین دابلوک است. حروف M, L, H به ترتیب کوتاه شده Medium, Low, High هستند.

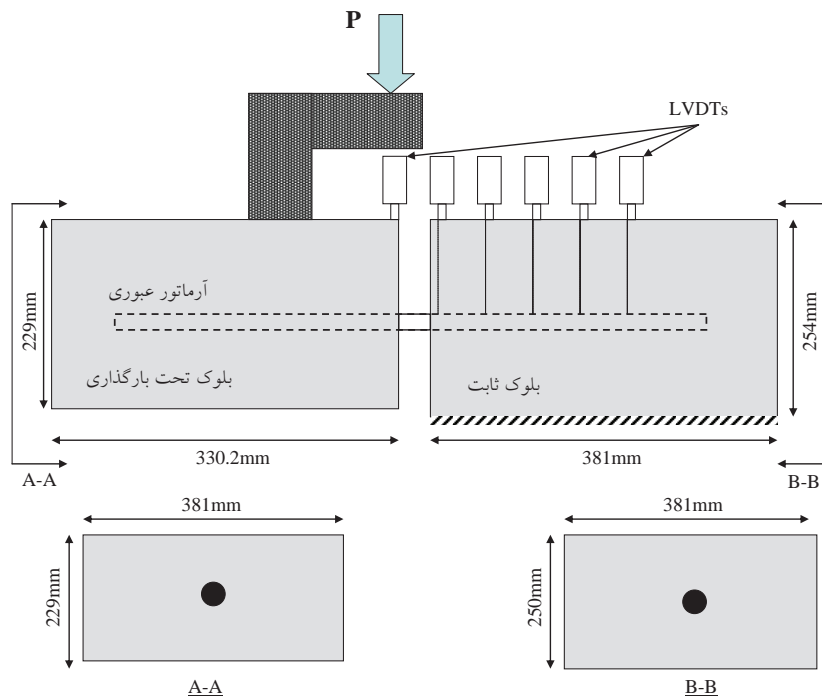
در شکل (۹) نحوه تغییرات (پروفیل) تغییر مکان میلگردهای عبوری در داخل بلوک سمت راست (ثابت) حاصل از مدل و مطالعه آزمایشگاهی ماناوا و همکاران رسم شده است. در این شکل نتایج مربوط به دو نمونه (LML) و (LLH) به همراه مشخصات رسم شده است. در هر دو نمودار نقاط نتایج آزمایشگاهی را در گامهای مختلف بارگذاری و در طول بلوک ثابت نشان می‌دهد. همچنین در این شکل منحنی بار-تغییر مکان شاخه‌ای نمونه (MML) در فاصله ۳/۲ میلی‌متر از اتصال، با نتایج این مدل رسم شده است. سختی اولیه و مقاومت به خوبی شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل مذکور توانایی تعیین نحوه تغییرات جابجایی در طول میلگرد عبوری در مراحل اولیه و نهایی بارگذاری را دارد و همچنین موقعیت نقطه عطف پروفیل تغییر مکان را نیز به خوبی شبیه‌سازی کرده است. به بیان دیگر، اندرکنش بتن بستر و میلگرد عبوری و همچنین حذف تدریجی بستر بتنی میلگرد در گامهای مختلف بارگذاری به گونه‌ای مناسب در این مدل در نظر شده که در واقع ریشه در ارابه رابطه مناسب برای سختی فنرهای بستر دارد.

(Solid)، میلگردهای عبوری (المانهای تیری) و المانهای تماسی جهت مدل‌سازی اندرکنش بتن و میلگرد میزان نیروی انتقالی را تخمین زده‌اند. باتاچاریا نیز با رویکردی مشابه و مدل‌سازی بستر به کمک یک سری فنر و میراگر نتایج مربوطه را استخراج کرده است. می‌توان مشاهده کرد که مقدار برش شاخه‌ای  $V(x=0)$  با توجه به الگوریتم پیشنهادی، نه تنها از دقت قابل قبولی برخوردار است، بلکه برای استخراج نتایج، نیازی به مدل‌سازیهایی پیچیده و تحلیلهای زمان‌بر نیست. لازم به ذکر است که باتاچاریا تنها میزان برش شاخه‌ای را در  $x=0$  تخمین زده که در شکل (۷) نیز نمایش داده شده است. [Bhattacharya, 2000]

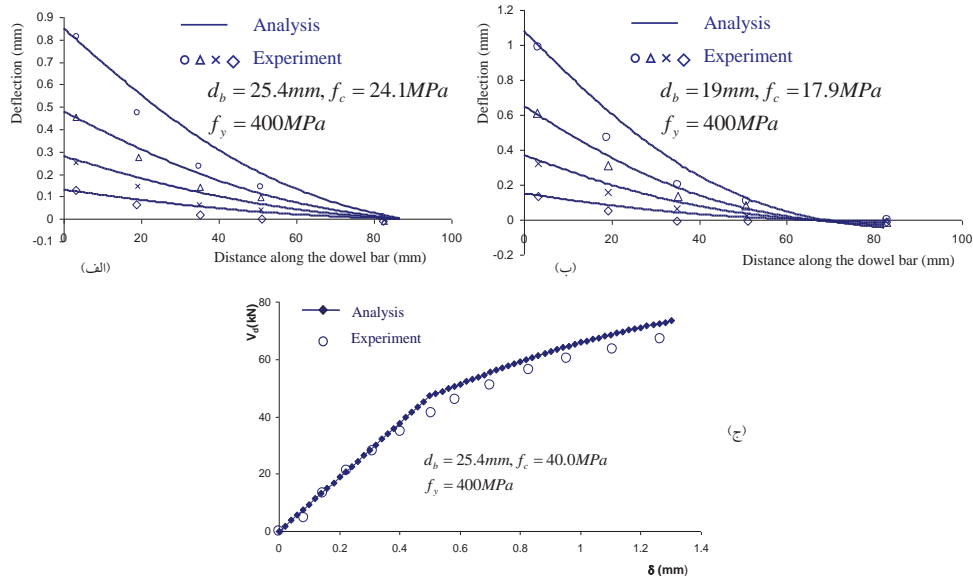
ماناوا و همکاران [Mannava et al., 1999] نیز اثر قطر میلگرد، مقاومت بتن و عرض اتصال را در روسازیها به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این مطالعه، روسازی با دو بلوک که توسط یک میلگرد ساده به یکدیگر متصل شده‌اند، شبیه‌سازی شده و پروفیل‌های تغییر مکان میلگردهای عبوری از طریق حسگرهای جابجایی سنج<sup>۱</sup> (LVDT) که بر روی میلگرد عبوری قرار داده شده‌اند، ثبت گردید (شکل ۸). بلوک سمت راست کاملاً ثابت بوده و بلوک سمت چپ تحت بارگذاری (اعمال تغییر مکان) قرار می‌گیرد. میلگرد عبوری از داخل بلوک سمت راست در نقاط مشخصی به حسگرهای جابجایی سنج متصل شده‌اند و از این طریق پروفیل و نحوه تغییرات جابجایی میلگردهای عبوری تحت بارگذاری در هر گام ثبت می‌شود. ماناوا و همکاران از الگوی خاصی



شکل ۷. مقایسه تغییرات برش در طول میلگرد عبوری در مرکز نمونه با آزمایش و مطالعه عددی باتاچاریا [Bhattacharya, 2000] و مایترا و همکاران [Maitra et al., 2009]



شکل ۸. مدل آزمایشگاهی ماناوا و همکاران به همراه جزئیات و نحوه اعمال بارگذاری و ثبت نتایج



شکل ۹. مقایسه پروفیل تغییر مکان میلگرد عبوری در طول بلوک ثابت حاصل از مدل و آزمایش، الف) نمونه LML، ب) نمونه LLH، ج) منحنی نیرو- تغییر مکان شاخه‌ای میلگرد نمونه MML به فاصله ۳/۲ میلی‌متر از صفحه اتصال

۵. نتیجه گیری  
مطالعات آزمایشگاهی مربوطه بصورت کیفی و کمی نشان داده شد. بر خلاف رویکردهای متداول و رایج در تحلیل سازه‌های مذکور که مبتنی بر بکارگیری روش اجزاء محدود می‌باشد، مدل و الگوریتم پیشنهادی از سرعت مناسبی برخوردار بوده که نهایت کاهش چشمگیر حجم محاسبات را در پی دارد. براساس مدل

در مقاله حاضر، انتقال نیرو از درزهای روسازیهای بتنی توسط میلگردهای عبوری مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل و ارزیابی قابلیت‌های انتقال نیرو با ارایه مدلی مبتنی بر تئوری تیر بر بستر ارتجاعی صورت پذیرفت و صحت مدل پیشنهادی بر اساس

داول در عملکرد درز روسازیهای بتنی، فصلنامه علمی پژوهشی مدرس، دوره ۵، شماره ۱، خرداد ۱۳۸۵، ص ۶۴-۵۵.

- Bhattacharya, K. (2000) "Nonlinear response of transverse joints of airfield pavements", Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, No. 2, pp. 168-177.

- Channakeshava, C., Barzegar, F. and Voyiadjis, G. Z. (1993) "Nonlinear FE analysis of plain concrete pavements with doweled joints", Journal of Transportation Engineering, Vol. 119, No. 5, pp. 763-780.

- Davids, W. G. (2000) "Effect of dowel looseness on response of jointed concrete pavements", Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, No. 1, pp. 50-57.

- Dei Poli, S., Di Prisco, M. and Gambarova, P. G. (1992) "Shear response, deformation, and subgrade stiffness of a dowel bar embedded in concrete", ACI Structural Journal, Vol. 89, No. 6, pp. 665-675.

- Dere, Y., Asgari, A., Sotelino, E. D., and Archer, G. C. (2006) "Failure prediction of skewed jointed plain concrete pavements using 3D FE analysis", Engineering Failure Analysis, Vol. 13, No. 6, pp. 898-913.

- El-Ariss, B. (2007) "Behavior of beams with dowel action", Engineering Structures, Vol. 29, No. 6, pp. 899-903.

- Hetenyi, M. I. (1958) "Beams on elastic foundation: Theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering", Ann Arbor : The University of Michigan Press, USA.

- Huang, Y. H. and Wang, S. T. (1973) "Finite element analysis of concrete slabs and its implications on rigid pavement design", Highway Research Record, No. 466, pp. 55-79.

- Maekawa, K. and Qureshi, J. (1996) "Embedded bar behavior in concrete under combined axial pullout and transverse displacement", Proceedings of JSCE., Vol. 30, No. 532, pp.183-195.

- Maekawa, K. and Qureshi, J. (1996) "Computational

حاضر نتایج زیر حاصل شد:

۱. رابطه‌ای مناسب برای پیش بینی رفتار الاستو-پلاستیک سختی فنرهای بستر بتنی میلگردهای عبوری (شاخه‌ای) ارایه شد که به وسیله آن مدل حاضر به وضعیت تیر بر بستر غیر ارتجاعی تعمیم یافته است.

۲. حذف تدریجی بستر بتنی میلگردهای عبوری، تحت بارگذاری اعمالی به خوبی شبیه سازی شده که نشان از دقت مناسب رابطه یادشده دارد.

۳. اعتبار سنجی در دو بخش مختلف، برای عمل شاخه‌ای و سازوکار انتقال نیرو در روسازیهای بتن مسلح صورت گرفت. مقایسه نتایج نیرو- تغییر مکان حاصل از مدل و نتایج متناظر آزمایشگاهی، نشان از کارایی و همچنین سرعت مدل یادشده دارد.

۴. بکارگیری تئوری BEF نشان داد که کالیبراسیون و استخراج پارامترهای مورد نیاز به راحتی امکان پذیر است.

۵. فرم صریح روابط موجب می‌شود که استخراج پروفیلها و نحوه تغییرات تغییر مکان، لنگر خمشی، دوران و برش در هر مرحله از بارگذاری در طول میلگرد به راحتی قابل حصول باشد.

۶. تعیین میزان برش و نیروهای انتقالی در این مدل بر اساس BEF پیشنهاد شد، بنابراین بکارگیری الگوریتمهای مبتنی بر تکرار بر این اساس از نرخ همگرایی و پایداری مناسبی برخوردار است.

## ۶. پی نوشتها

- 1- Concrete pavements
- 2- Beam on elastic foundation
- 3- Timoshenko and Lessels
- 4- Closed-form
- 5- Curvature influenced zone
- 6- Iterative-based scheme
- 7- Iteration
- 8- Construction joint
- 9- Keaton and Bishop
- 10- Linear variable displacement transducer

## ۷. مراجع

- حسینی، ابوالفضل و پاژنگ، علی (۱۳۸۷) "تاثیر سختی میله‌های



- Soroushian, P., Obaseki, K., Rojas, M. and Najm, H. S. (1987) "Behavior of bars in dowel action against concrete cover", *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 2, pp. 170-176.
- Soroushian, P., Obaseki, K., Baiyasi, M. I., El-Sweidan, B. and Choi, K. (1988) "Inelastic cyclic behavior of dowel bars", *ACI Structural Journal*, vol. 85, No. 1, pp. 23-29.
- Tabatabaie, A. M. and Barenberg, E. J. (1980) "Structural analysis of concrete pavement systems", *Transportation Engineering Journal*, Vol. 106, No. 5, pp. 493-506.
- Tia, M., Armaghani, J. M., Wu, C. L., Lei, S. and Toye, K. L. (1987) "FEACONS III computer program for analysis of jointed concrete pavements", *Transportation Research Record*. pp. 12-22.
- Vintzeleou, E. N. and Tassios, T. P. (1986) "Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions", *Magazine of Concrete Research*, vol. 38, No. 134, pp. 13-22.
- Vintzeleou, E. N. and Tassios, T. P. (1987) "Behavior of dowels under cyclic deformations", *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 1, pp.18-30.
- Wadkar, A., Mehta, Y., Cleary, D., Guo, E., Musesumeci, L., Zapata, A. and Kettleson, W. (2011) "Load-Transfer efficiencies of rigid airfield pavement joints based on stresses and deflections", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 8, pp. 1171-1180.
- William, G. W. and Shoukry, S. N. (2001) "3D finite-element analysis of temperature-induced stresses in dowel jointed concrete pavements", *International Journal of Geomechanics*, Vol. 1, No. 3, pp. 291-307.
- Maekawa, K. and Qureshi, J. (1997) "Stress transfer across interface in reinforced concrete due to aggregate interlock and dowel action", *Proceedings of JSCE.*, Vol. 31, No. 538, pp. 227-239.
- Maekawa, K. and Qureshi, J. (1997) "Stress transfer across interface in reinforced concrete due to aggregate interlock and dowel action", *Proceedings of JSCE.*, Vol. 34, No. 557, pp.159-177.
- Mahboub, K. C., Liu, Y. and Allen, D. L. (2004) "Evaluation of temperature responses in concrete pavement", *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 130, No. 3, pp. 395-401.
- Maitra, S. R., Reddy, K. S. and Ramachandra, L. S. (2009) "Load transfer characteristics of dowel bar system in jointed concrete pavement", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 135, No. 11, pp. 813-821.
- Mannava, S. S., Bush, T. D. and Kukreti, A. R. (1999) "Load-deflection behavior of smooth dowels", *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 9, pp. 891-898.
- Nishizawa, T., Koyanagawa, M., Takeuchi, Y. and Kimura, M. (2001) "Study on mechanical behavior of dowel bar in transverse joint of concrete pavement", *Proceedings of 7th. International Conference on Concrete Pavement*, Organized by International Society for Concrete Pavements, September 9-13, 2001, Lake Buena Vista
- Paualy, T., Park, R. and Philips, M. H. (1974) "Horizontal construction joints in cast-in-place reinforced", *ACI Special Publication*, Vol. 42, pp. 599-616.
- Shoukry, S. N., Fahmym M., Prucz, J. and William, J. (2007) "Validation of 3DFE analysis of rigid pavement dynamic response to moving traffic and non-linear temperature gradient effects", *International of Journal of Geomechanics*, Vol. 7, No. 1, pp. 16-24.
- Soltani, M. and Maekawa, K. (2008) "Path-dependent mechanical model for deformed reinforcing bars at RC interface under coupled cyclic shear and pull-out tension", *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 4, pp. 1079-1091.