

# بررسی تحلیلی مقاومسازی قاب‌های بتنی با میانقاب مصالح بنایی استفاده از پلیمرهای مسلح فیبری (FRP)<sup>۱</sup>

فریبرز ناطقی الهی<sup>۱\*</sup>، ایوب دهقانی<sup>۲</sup>

۱- استاد پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۲- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

\*تهران، صندوق پستی ۳۹۱۳ - ۱۹۳۹۵

nateghi@iiees.ac.ir

(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: فروردین ۱۳۸۷)

**چکیده-** بدیهی است ساختمان‌های بتنی که سختی جانبی کافی نداشته و به صورت ضعیف طراحی و اجرا شده‌اند، در هنگام وقوع زمین‌لرزه‌های شدید آسیب‌های قابل توجهی را تجربه می‌کنند. یکی از روش‌های مناسب مقاومسازی این گونه ساختمان‌ها برای اصلاح رفتار سازه و جلوگیری از فروریزش، تقویت میانقاب‌های مصالح بنایی با کامپوزیت‌های پلیمر مسلح (FRP) به‌گونه‌ای است که این اعضا به صورت دیوارهای سازه‌ای عمل کنند. در این مقاله ابتدا با استفاده از روش المان محدود، روش مدل‌سازی میانقاب با دستک معادل بررسی شده و سپس با معرفی رفتار دستک‌های فشاری و کششی، میانقاب در دو حالت عادی و مقاوم‌شده مدل‌سازی شده است. نتایج تحلیل‌های استاتیکی فزاینده غیرخطی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده توانسته است رفتاری نزدیک به رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه کند.

**کلید واژگان:** ساختمانهای بتنی، کامپوزیت‌های پلیمر مسلح، میانقاب، المان محدود، تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی.

## ۱- مقدمه

یکی از دلایل اصلی خرابی ساختمان‌ها در هنگام وقوع زمین‌لرزه سختی جانبی کم آنها است [۱]. برای رفع این نقیصه تاکنون روش‌های متعددی مانند اضافه کردن دیوار برشی، بادبند یا جکت‌کردن<sup>۲</sup> اعضای قاب پیشنهاد شده که هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارد. بر اساس تحقیقات سال‌های اخیر دو روش دیگر برای

مقاومسازی این‌گونه ساختمان‌ها ارائه شده است. در روش اول میانقاب‌های بتنی<sup>۳</sup> برای بالا بردن سختی جانبی به ساختمان اضافه می‌شود و در روش دوم میانقاب‌های بنایی موجود در ساختمان که غیرسازه‌ای و شکننده‌اند، به‌گونه‌ای تقویت می‌شوند که مانند دیوارهای سازه‌ای عمل کنند. مقاومسازی قاب بتنی با استفاده از میانقاب بتنی در سال ۱۹۷۱ توسط Uzsoy و Ersoy پیشنهاد

1. Fiber Reinforced Polymer  
2. Jacketing

3. Concrete Infill

مؤلفه‌های دیگر زلزله، باعث ناپایداری میانقاب نشود. تقویت و جلوگیری از ناپایداری خارج از صفحه میانقاب‌های غیرسازه‌ای با استفاده از کامپوزیت‌های پلیمر مسلح، با اختصار کامپوزیت، یکی از روش‌های مقاومت‌سازی است که اخیراً مورد توجه قرار گرفته. این روش در مقایسه با اجرای میانقاب بتنی سریعتر و عملی‌تر بوده و در هنگام اجرا کمترین اختلال را در کاربری ساختمان ایجاد می‌کند.

در ابتدا مقاومت‌سازی با کامپوزیت‌ها بر روی پایه پلها و ستونهای سازه‌ها انجام می‌شد. Pantelides و همکاران در آزمایش‌های متعدد نشان دادند که ظرفیت پایه پلهایی که با پلیمر مسلح کربنی<sup>۲</sup> مقاوم شده‌اند، به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۵]. Triantafyllou رفتار درون صفحه‌ای و خارج از صفحه دیوارهای مصالح بنایی را که با پلیمر مسلح کربنی به صورت چسپاندن به سطح خارجی مقاوم شده بودند در آزمایشگاه مطالعه کرده و گزارشی را از مودهای شکست منتشر کرد [۶]. تأثیر پارامترهایی مانند نوع کامپوزیت، الگوی قرارگیری آن و نوع بارگذاری بر رفتار دیوارهای بنایی مقاوم‌شده توسط Albert و همکاران تحت آزمایش‌های متعددی بررسی شده است [۷].

هدف از این مطالعه نیز، ارائه الگویی مناسب برای مدل‌سازی قاب‌های بتنی میان‌پر با میانقابهای بنایی است که با کامپوزیت‌ها پلیمری مقاوم شده‌اند. بدین منظور ابتدا بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی [۸] و به‌کمک تحلیل‌های المان محدود، رفتار قاب میان‌پر با آجر فشاری ارزیابی شده و مدلی مناسب برای معرفی خصوصیات دستک معادل انتخاب شده است. سپس رفتار اصلاحی برای میانقاب مقاوم‌شده تدوین شده و در مدل‌سازی با دستک‌های کششی و فشاری به کار رفته است. در پایان مقایسه‌ای میان مدل ساخته شده و آزمون‌های آزمایشگاهی [۹] انجام شده است.

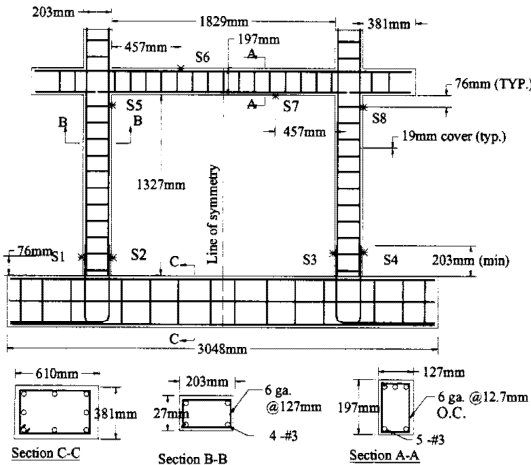
شد. آزمایش‌های این محققان بر روی قاب‌های بتنی یک طبقه و یک دهانه نشان داد که افزودن میانقاب بتنی می‌تواند باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت و سختی جانبی قاب شود [۲]. Higashi و Kokusho تفاوت میان اثر میانقاب بتنی درجا و پیش‌ساخته را بررسی کردند. مقاومت جانبی تقریباً یکسان در دو روش و اهمیت اتصال مناسب میانقاب پیش‌ساخته و قاب، برخی از نتایج این تحقیقات بوده است [۳]. Canabay و همکاران با آزمایش روی قاب دوطبقه و سه‌دهانه با مقیاس ۱/۳ و با استفاده از نیروسنج‌های خاص در پایه ستونهای خارجی، سهم میانقاب را در رفتار سازه ارزیابی کرده و اهمیت طول مهاری آرماتورها و اثر لغزش آرماتورهای طولی ستون را مطالعه کردند [۴].

اگرچه این مطالعات نشان می‌دهد که میانقاب بتنی تأثیر مطلوبی بر رفتار سازه دارد، اما استفاده از این روش برای مقاومت‌سازی سازه‌های موجود به‌دلایلی مانند سختی اجرا و لزوم تخلیه کامل ساختمان در هنگام عملیات مقاوم‌سازی، بسیار دشوار است. از طرفی با توجه به وجود تعداد زیادی ساختمان با ارتفاع کم و یا متوسط در سطح کشور که در برابر زلزله آسیب‌پذیرند، به روشی عملی و مناسب برای مقاوم‌سازی اینگونه ساختمان‌ها نیاز است.

در این میان یکی از روش‌های سودمند برای مقاوم‌سازی اینگونه ساختمان‌ها که عموماً ضعیف طراحی شده و شکل‌پذیری کافی ندارند، آن است که میانقاب‌های غیرسازه‌ای و شکننده موجود در ساختمان به صورتی تقویت شود که مانند دیوارهای سازه‌ای عمل کند. بر اساس تحقیقات انجام شده میانقابهای شکننده و غیرسازه‌ای به‌ویژه هنگام شروع زلزله سهم به‌سزایی را در عملکرد ساختمان دارند. این اثر تا زمانی وجود دارد که انتقال تنش، بین میانقاب و اعضای قاب به صفر نرسیده باشد و نیروهای اینرسی خارج از صفحه<sup>۱</sup>، ناشی از

## ۲- مرور آزمون‌های آزمایشگاهی برای مدل سازی المان محدود

ارزیابی قاب میان‌پر با آجر فشاری به کمک روش المان محدود نیازمند آزمون‌هایی است که در آن ویژگی‌های مصالح کاملاً معرفی شده و امکان مقایسه نتایج پس از تحلیل فراهم شده باشد. به این منظور آزمون‌های انجام شده توسط Al-Chaar در سال ۱۹۹۹ انتخاب شد. ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در این آزمایش‌ها در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۱ جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌های آزمایش شده [۸]

جدول ۱ خصوصیات مصالح مدل‌های آزمایشگاهی [۸]

خصوصیات		مواد
مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	میانگین مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	
۲۹،۹	۳۸،۴۴	بتن
۲۰۰	۳۳۸،۵۰	آرماتور
	۸۰،۹۶	آجر فشاری
	۲۶،۷۴	نمونه منشوری

## ۳- تحلیل فزاینده غیرخطی<sup>۱</sup> به کمک روش المان محدود

آزمون‌های آزمایشگاهی معرفی شده در [۸] که شامل قاب بتنی، میانقاب آجر فشاری و اتصال میان آنها به وسیله ملات بنایی است، به کمک نرم‌افزار DIANA به صورت دوبعدی و با در نظر گرفتن تنش‌های صفحه‌ای و منظور کردن ضخامت در بعد سوم مدل‌سازی شده و تحلیل‌های عددی متعددی بر روی آن انجام گرفته شده است. در این مدل قاب بتنی شامل تیر، ستون‌ها و تیر فونداسیون و همچنین میانقاب مصالح بنایی با المان‌های صفحه‌ای CQ16M و حدفاصل قاب و میانقاب که با ملات بنایی پر می‌شود، با المان‌های رابط<sup>۲</sup> میان دو خط با نام CL12I تعریف شده است. CQ16M یک المان چهارضلعی هشت‌گره‌ای جزء دسته المان‌های تنش صفحه‌ای و CL12I المان حدفاصل میان دو خط در مدل دوبعدی است، که هر دو المان بر اساس درون‌یابی درجه دوم عمل می‌کنند. همچنین برای جلوگیری از تمرکز تنش در محل اعمال بار جانبی از ورق فولادی الاستیک با ابعاد ۲۰×۱۲۷×۲۰ میلی‌متر استفاده شده که با المان‌های

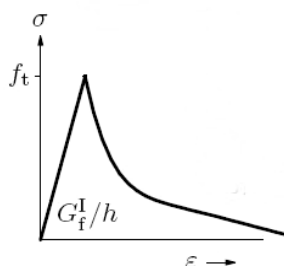
آزمایش‌ها بر روی قاب بتنی یک دهانه و یک طبقه با میانقاب مصالح بنایی در مقیاس ۱/۲ برای مطالعه ظرفیت باربری قاب میان‌پر قبل و بعد از ترک‌خوردگی تحت جابه‌جایی نسبی ۹ درصد انجام شده است [۸].

ارتفاع مدل برابر ۱/۵ متر، عرض دهانه یعنی فاصله مرکز تا مرکز ستون‌ها برابر ۲ متر، مقطع ستون‌ها مربعی با ابعاد ۲۰۳×۱۲۷ میلی‌متر، ابعاد تیر ۱۹۷×۱۲۷ میلی‌متر، نسبت ارتفاع به ضخامت برای میانقاب آجر فشاری برابر ۲۳، نسبت ارتفاع به عرض دهانه برابر ۰،۷۵ و ضخامت میانقاب برابر ۵/۸ سانتی‌متر بوده است. شکل (۱) جزئیات اجرایی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها تیر تحتانی کاملاً به کف صلب شده و بارگذاری به صورت تناوبی به تیر فوقانی اعمال شده است.

از آنجا که نرم‌افزار DIANA در مدل‌سازی مصالح بنایی نسبت به نرم‌افزارهای مشابه توانایی بالاتری دارد، از این نرم‌افزار برای مدل‌سازی المان محدود استفاده شده است.

1.Pushover  
2.Interface Element

گرفتن فرایند کششی تهیه شده است. شاخصه مهم این مدل آن است که بر اساس پارامترهای مهندسی مانند مقاومت کششی، فشاری و انرژی شکست<sup>۴</sup> تعریف می‌شود و تمامی حالت‌های بارگذاری را پوشش می‌دهد. درحالی‌که سایر مدل‌ها فقط بر روی یک حالت بارگذاری متمرکز می‌شوند [۱۰]. نرم‌شدگی کششی مدل برای بتن در ناحیه کششی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ نرم‌شدگی کششی در مدل اصلاح شده ماکاوا [۱۰]

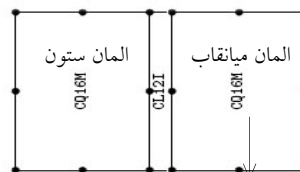
همچنین داده‌های ورودی برای معرفی مصالح بتنی در جدول (۲) آورده شده که در آن  $f_c'$  مقاومت فشاری بتن،  $f_t$  مقاومت کششی بتن،  $g_f$  انرژی شکست و  $w_{cr}$  عرض باند ترک در بتن است.

جدول ۲ داده‌های ورودی برای معرفی مصالح بتنی با مدل اصلاح شده مائکاوا

$f_c'$ MPa	$f_t$ MPa	$g_f$ N / mm	$w_{cr}$ mm	$\nu$
۳۸,۴۴	۳,۸	۲۴۰	۱۰	۰,۲

برای معرفی مصالح میانقاب آجری که رفتار ناهمسانگرد دارد، مدل پلاستیسیته رانکین-هیل<sup>۵</sup> در حالت تنش صفحه‌ای استفاده شده که فرمول‌بندی آن توسط Lourenco و همکاران انجام شده است [۱۱ و ۱۲]. این مدل بر پلاستیسیته چندسطحی متکی است که از ترکیب معیار تسلیم رانکین برای نرم‌شدگی و سخت‌شدگی در بارگذاری کششی و معیار تسلیم هیل

هشت‌گرهی مدل‌سازی شده است. از آنجا که در نمونه‌های آزمایش شده در [۸] تیر فونداسیون کاملاً به کف بسته شده و هیچ‌گونه حرکتی ناشی از بارگذاری جانبی ندارد، گره‌های المان‌های مجاور کف در مدل تحلیلی در راستای X و Y بسته شد. برای نمونه چیدمان المان ستون بتنی در مجاورت میانقاب و حدفاصل آنها در شکل (۲) نشان داده شده است.



المان رابط معرف ملات در محل اتصال قاب و میانقاب

شکل ۲ نحوه تعریف المان قاب در مجاورت میانقاب و المان رابط

در دو حالت میکرو-مدل و ماکرو-مدل می‌توان میانقاب آجری را با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی کرد. در مدل‌سازی میکرو پس از مدل‌سازی هر آجر، ملات میان آن و آجرهای مجاور توسط المان رابط و مصالح خاص آن تعریف شده و پس از تحلیل، محل ترک در میانقاب و شیوه انتشار آن قابل تعیین است. در مدل‌سازی ماکرو میانقاب به‌صورت یک غشای یکپارچه با المان‌های پیوسته و تعریف مصالح بنایی برای تمامی غشا، مدل‌سازی شده و فقط مرز قاب و میانقاب با المان رابط مدل‌سازی می‌شود. از آنجا که در این مطالعه فقط تنش‌های میانقاب پس از بارگذاری مورد نظر است، از مدل‌سازی ماکرو استفاده شده است.

## ۴- مدل مصالح

مصالح بتنی بر اساس مدل اصلاح شده مائکاوا<sup>۱</sup> تعریف شده است. این مدل از ترکیب مدل خرابی چندمحوره پلاستیسیته<sup>۲</sup> برای در نظر گرفتن انهدام بتن در فرآیند فشاری با مدل ترک بر اساس کرنش کلی<sup>۳</sup> برای در نظر

4. Fracture Energy  
5. Rankin-Hill

1. Modified Maekawa  
2. Multi-Axial Damage Plasticity Model  
3. Crack Model Based on Total Strain

بوده و توانایی مدل‌سازی اتصالات ایجاد شده به‌وسیله ملات را دارد. داده‌های ورودی برای معرفی مشخصات مدل سطح تماس بر اساس جدول (۴) معرفی شده است.

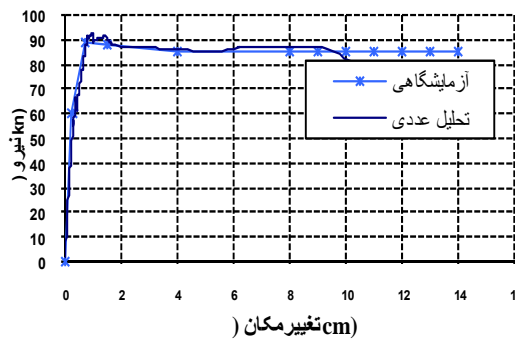
جدول ۴ داده‌های ورودی برای معرفی مدل سطح تماس [۱۴]

مشخصات کششی		مشخصات فشاری	
$f_t$	$g_f'$	$f_c$	$g_{fc}$
MPa	N / mm	MPa	N / mm
۰٫۲۵	۰٫۰۱۸	۸٫۵	۵٫۰
مشخصات برشی			
$C$	$g_f''$	$\tan \psi$	$\tan \phi$
MPa	N / mm		
۱	۰٫۱۲۵	۰٫۶	۰٫۷۵

در جدول ۴  $f_t$  و  $f_c$  به‌ترتیب مقاومت کششی و فشاری،  $g_f'$  و  $g_{fc}$  انرژی شکست به‌ترتیب در مود شکست کششی و فشاری،  $C$  چسبندگی اولیه درز اتصال،  $\phi$  زاویه اصطکاک و  $\psi$  زاویه اتساع است.

## ۵- تحلیل المان محدود

بارگذاری از نوع کنترل تغییرمکان تا جابه‌جایی نسبی حداکثر ۷٫۵ درصد به مدل اعمال شده و حل از نوع تکرار بر اساس روش نیوتن - رافسون با قاعده همگرایی انرژی داخلی انتخاب شده است. مقایسه منحنی نیرو تغییرمکان قاب میان‌پر در آزمون آزمایشگاهی و تحلیل عددی در شکل (۴) آورده شده است.



شکل ۴ منحنی نیرو- تغییر مکان قاب میان‌پر

برای نرم‌شدگی در بارگذاری فشاری حاصل می‌شود [۱۰]. با این مدل پلاستیسیته می‌توان مقاومت‌های متفاوت موازی و عمود بر بستر اتصال را مدل‌سازی کرد. داده‌های ورودی برای معرفی مصالح بنایی در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳ داده‌های ورودی برای معرفی مصالح بنایی میانقاب

بارگذاری کششی-معیار رانکین					
$f_{tx}$	$f_{ty}$	$\alpha_\tau$	$\alpha_h$	$g_{ftx}$	$g_{fty}$
MPa	MPa			N / mm	N / mm
۰٫۲۵	۰٫۳۵	۱	۱	۰٫۰۰۰۳۴	۰٫۰۰۱
بارگذاری فشاری-معیار هیل					
$f_{cx}$	$f_{cy}$	$\beta$	$\gamma$	$g_{fcx}$	$g_{fcy}$
MPa	MPa			N / mm	N / mm
۰٫۲۵	۲۶٫۷	-۱	۳	۱۵	۲۰
					$k_p$
					۰٫۰۰۱۲

در جدول (۳)  $f_{tx}$  و  $f_{ty}$  مقاومت کششی در جهت X و Y،  $\alpha_h$  ضریب تعیین سهم برش در شکست کششی،  $\alpha_\tau$  ضریب وابستگی سطح المان به طول معادل،  $g_{ftx}$  و  $g_{fty}$  انرژی شکست کششی در جهت X و Y،  $f_{cx}$  و  $f_{cy}$  مقاومت فشاری در جهت X و Y،  $\beta$  ضریب ترکیب تنش‌های فشاری،  $\gamma$  ضریب تعیین سهم برش در شکست فشاری،  $k_p$  کرنش پلاستیک متناظر با بیشینه‌ی تنش فشاری و  $g_{fcx}$  و  $g_{fcy}$  انرژی شکست فشاری در جهت X و Y است. ضریب پواسون ۰٫۱۵ و مدول یانگ نیز برابر ۸۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. از آنجا که در آزمون‌های آزمایشگاهی [۸] فقط مقاومت فشاری میانقاب برآورد شده است، پارامترهای جدول (۳) بر اساس تحقیقات Lourenco برای دیوارهای آجری در نظر گرفته شده است [۱۳].

رفتار المان‌های رابط نیز بر اساس مدل سطح تماس تنش صفحه‌ای در حالت دوبعدی که توسط Van Zijl توسعه داده شده، انتخاب شد [۱۴]. این مدل از نوع مرکب بوده و توانایی مدل‌سازی گسیختگی، اصطکاک لغزشی و خردشدگی<sup>۱</sup> در امتداد المان را دارد. این مدل بر پلاستیسیته چند سطحی متکی

1. Combined Cracking-Shearing-Crushing

## ۶- دقت روش‌های مدل‌سازی میانقاب

روش‌های متفاوتی برای محاسبه عرض دستک قطری معادل بدون نیاز به تحلیل‌های عددی، توسط Mainstone در سال ۱۹۷۱، Drysdale در سال ۱۹۹۴، El-Dakhakhni در سال ۲۰۰۱ و دیگران پیشنهاد شده است. نتایج تحلیل‌های عددی قاب مورد نظر نشان می‌دهد که عرض گسترش تنش قطری از تطابق مناسب‌تری با روش پیشنهادی El-Dakhakhni برخوردار است. لذا در بخش دوم این مطالعه، از روش مذکور استفاده شده است. در این روش عرض دستک قطری معادل - که بیانگر عرض گسترش تنش قطری در میانقاب است - به صورت زیر محاسبه می‌شود:

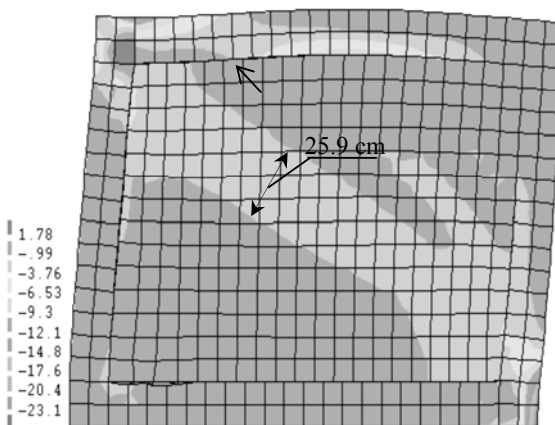
$$A = \frac{(1-\alpha_c)\alpha_c h t}{\cos \theta} \quad (1)$$

$$\alpha_c h = \sqrt{\frac{(M_{pj} + 0.4 M_{pc})}{t f'_m - 0}} \leq 0.4 h \quad (2)$$

که  $A$  سطح مقطع دستک قطری معادل،  $\theta$  برابر با  $\tan^{-1}(h/l)$ ،  $h$  ارتفاع ستون،  $l$  دهانه تیر،  $\alpha_c$  نسبت ارتفاع تماس ستون و میانقاب به ارتفاع ستون،  $M_{pj}$  و  $M_{pc}$  به ترتیب ممان پلاستیک اتصال و ممان پلاستیک ستون،  $t$  ضخامت میانقاب،  $f'_{m-0}$  مقاومت فشاری پانل میانقاب موازی با بستر اتصال که برابر  $0.7 f'_{m-90}$  در نظر گرفته می‌شود و  $f'_{m-90}$  مقاومت فشاری پانل میانقاب عمود بر بستر اتصال<sup>۲</sup> است [۱۵].

در صورتی که پارامترهای معرفی شده برای قاب مورد نظر محاسبه شود، رابطه (۱) مقدار ۱۴۳ سانتی‌متر مربع را برای سطح مقطع دستک قطری پیشنهاد می‌کند. با فرض آنکه ضخامت دستک برابر با ضخامت میانقاب باشد، مقدار محاسبه شده برای عرض دستک ۲۴/۶۵ سانتی‌متر است که نزدیک به مقدار به دست آمده از تحلیل عددی است. بنابراین در تحلیل‌های فزاینده غیرخطی که نتایج آن در ادامه خواهد آمد، میانقاب بنایی با دستک قطری معادل

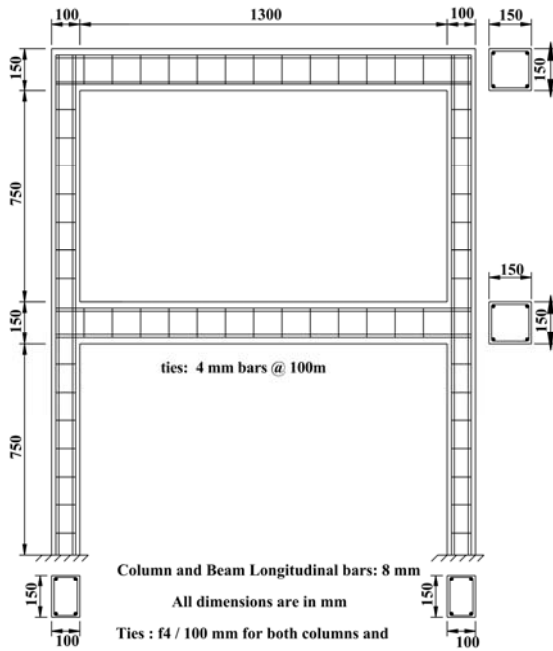
نتایج تحلیل عددی، تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین لازم است ذکر شود که منحنی نیرو - تغییر مکان پس از جابه‌جایی ۹ سانتی‌متری دچار افت می‌شود. شکل (۵) توزیع تنش فشاری قطری را در میانقاب نشان می‌دهد. در این شکل مد خردشدگی کنج<sup>۱</sup> به علت رفتار درون صفحه‌ای میانقاب به شکل گسترش تنش فشاری در کنج‌های تحت بار مشاهده می‌شود.



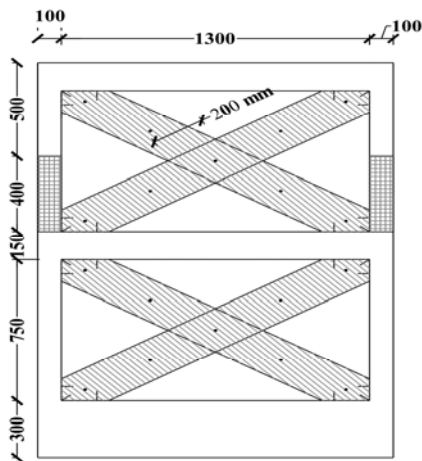
شکل ۵ توزیع تنش فشاری قطری در میانقاب

در این گام میانقاب به حد نهایی باربری خود رسیده و درگام‌های بعدی در عمل از باربری خارج شده و باربری توسط اعضای قاب ادامه یافته و لذا منحنی نیرو تغییر مکان دچار افت می‌شود. امان‌های رابط تعریف شده در مدل، امکان لغزش میانقاب نسبت به اعضای قاب را فراهم ساخته است. این لغزش را می‌توان بر اساس تغییر مکان نسبی مش‌های میانقاب و اعضای قاب مشاهده کرد. پیکان در شکل (۵) محل لغزش میانقاب را نسبت به تیر فوقانی نشان می‌دهد.

عرض گسترش تنش قطری که از نتایج تحلیل به دست آمده، با توجه به ابعاد مش‌بندی برابر ۲۵/۹ سانتی‌متر محاسبه شده است. این تحلیل نشان می‌دهد که میانقاب را می‌توان به وسیله دستک قطری با سطح مقطع مستطیلی و عرضی برابر با عرض گسترش تنش قطری و ضخامتی برابر ضخامت میانقاب مدل‌سازی کرد.



شکل ۶ جزئیات میلگردگذاری [۹]



شکل ۷ شیوه مقاومسازی با ورق پلیمر مسلح کربنی [۹]

جدول ۴ خصوصیات مصالح در مدل‌های آزمایشگاهی [۹]

خصوصیات		مواد
گیگاپاسکال	مگاپاسکال	مگاپاسکال
$E = 30$	نمونه مقاوم شده $f'_c = 12$	نمونه کنترل $f'_c = 19.5$
$E = 200$	$f_u = 532$	$f_y = 388$
$E = 230$	$\epsilon_u = 1/5 \%$	$f_t = 2230$

مدل‌سازی شده و خصوصیات آن به روش پیشنهادی EI-Dakhkhni محاسبه شده است.

## ۷- مروری بر تست‌های آزمایشگاهی برای

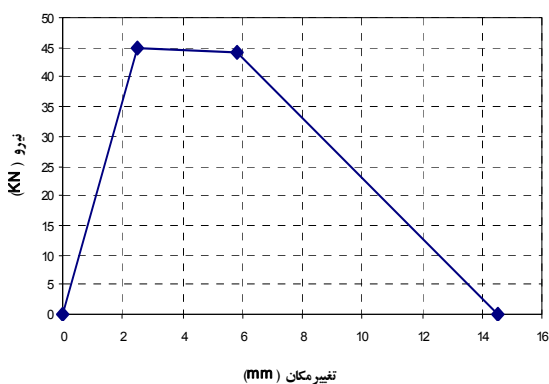
### مدل‌سازی میانقاب مقاوم شده

در ادامه برای مدل‌سازی میانقاب مقاوم شده با پلیمرهای مسلح فیبری روشی ارائه شده و برای نشان دادن توانمندی آن و مقایسه با رفتار واقعی میانقاب مقاوم شده، آزمون‌های انجام شده توسط Erduran و همکاران بر روی هفت نمونه قاب دو طبقه و یک دهانه همراه با میانقاب آجری با مقیاس ۱/۳ انتخاب و توصیف می‌شود. در این آزمایش‌ها نمونه اول قاب میان‌پر با مصالح بنایی، به عنوان نمونه کنترل و نمونه‌های دیگر با میانقاب مقاوم شده توسط پلیمر مسلح کربنی تحت بارگذاری تناوبی آزمایش شده است [۹].

انجام سریع عملیات مقاوم‌سازی و ایجاد کمترین اختلال در کاربری ساختمان از مزیت‌های عمده این روش است که در هنگام عملیات اجرایی آزمایش مورد تأیید قرار گرفته است. یکی از اهداف اصلی این روش کاهش تغییر مکان نسبی درون طبقه‌ای است. برای این منظور ورق‌های پلیمری مسلح به صورت قطری بر روی میانقاب چسبانده و در دو انتها به قاب مهار می‌شود. در هنگام بارگذاری یکی از قطرهای میانقاب تحت فشار و دیگری تحت کشش قرار می‌گیرد و به علت عملکرد فشاری قطری میانقاب و عملکرد کششی قطری ورق‌های پلیمری مسلح، رفتار قاب میان‌پر بهبود فراوانی می‌یابد. شکل (۶) جزئیات قاب و شکل (۷) شیوه مقاوم‌سازی را نشان می‌دهد. میانقاب نمونه‌ها با آجر سفالی ساخته شده و مجموع ضخامت پلاستر دو طرف و گوشته‌های آجر سفالی برابر ۵ سانتی‌متر است. پلیمر مسلح کربنی در دو طرف میانقاب قرار گرفته و برای اتصال آن به میانقاب و بتن از انکرهای خاصی استفاده شده است. جدول (۴) ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد.

رفتار دستک قطری فشاری بر اساس روش پیشنهادی El-Dakhakhni به صورت مدل سه خطی مطابق شکل (۹) تعریف شده است. این مدل بر اساس چهار پارامتر تغییر مکان اولیه، تغییر مکان ثانویه، تغییر مکان نهایی و مقاومت فشاری میانقاب تعریف می‌شود.

برای تعریف رفتار دستک‌های کششی باید چند اثر مختلف به‌طور همزمان در نظر گرفته شود. ورق‌های پلیمرهای مسلح کربنی مورد استفاده در آزمون‌های آزمایشگاهی Erduran و همکاران دارای الیاف یک‌جهته بوده و عرض آن برابر ۲۰۰ میلی‌متر است. این ورق‌ها به شکل X بر روی قطره‌های کششی و فشاری میانقاب قرار گرفته است. بر اساس آزمون‌های کشش محوری بر روی نمونه‌هایی با عرض ۲۵ میلی‌متر از پلیمرهای مسلح کربنی، مقاومت کششی آن برابر ۱۰۰۰ مگاپاسکال گزارش شده است [۹].



شکل ۹ مدل رفتاری دستک فشاری قطری

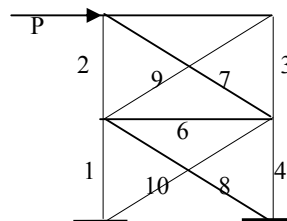
با توجه به آنکه میزان کشش تحمل شده توسط دستک‌های کششی باید ترکیبی از عملکرد همزمان سه مولفه میانقاب آجری، پلاستر ۱۰ میلی‌متری و ورق‌های پلیمری باشد، لذا نمی‌توان مقدار به‌دست‌آمده از آزمایش کشش محوری بر روی نمونه ورق‌های پلیمری را به‌عنوان مقاومت کششی میانقاب مقاوم‌شده در نظر گرفت. از طرف دیگر مشاهدات حین آزمایش نشان می‌دهد که ماکزیمم نیروی تحمل شده توسط دستک‌های کششی بر اساس مقاومت انکرها متصل کننده ورق‌های پلیمری و اعضای قاب تنظیم می‌شود [۹].

در ادامه برای کنترل رفتار مفصل معرفی شده برای میانقاب عادی و میانقاب مقاوم‌شده در نرم‌افزار SAP2000، از نتایج این آزمون‌ها استفاده شده است.

## ۸- مدل‌سازی و تحلیل فزاینده غیر خطی

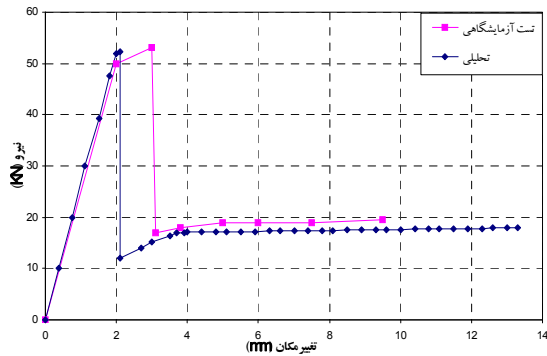
روند این مطالعه مشتمل بر انتخاب مدل‌های رفتاری است که بتوان به کمک آن‌ها، میانقاب مقاوم شده را به‌صورت دستک معادل مدل‌سازی کرد. هنگامی که بارگذاری باعث ایجاد کشش قطری می‌شود، میانقاب مقاوم‌شده به‌علت مقاومت کششی بالای ورق‌های پلیمر کربنی، کشش قابل توجهی را تحمل می‌کند، بنابراین استفاده از دستک کششی برای مدل‌سازی میانقاب در چنین شرایطی از بارگذاری، منطقی به‌نظر می‌رسد. برای ارزیابی مدل رفتاری ارائه شده در میانقاب‌های عادی و مقاوم‌شده، مدل‌سازی تست‌های آزمایشگاهی [۹] با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 انجام شده است.

میانقاب مقاوم‌نشده به صورت یک دستک فشاری در هر طبقه و میانقاب مقاوم‌شده به صورت دو دستک در هر طبقه یکی با عملکرد فشاری و دیگری کششی مدل‌سازی شده و تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی تا جابه‌جایی ۳ سانتی‌متری انجام شده است. از آنجا که مصالح بنایی مقاومت کششی ناچیزی دارند که معمولاً از آن صرف نظر می‌شود، برای مدل‌سازی قاب اولیه از مقاومت کششی میانقاب اغماض شده و مطابق شکل (۸) مدل‌سازی با هشت المان انجام شده است. در این شکل میانقاب‌ها با المان‌های ۷ و ۸ مدل‌سازی شده که نشانگر دستک فشاری قطری با رفتار محوری است. در مدل‌سازی قاب مقاوم‌شده علاوه بر هشت المان مذکور از دو المان ۹ و ۱۰ که نشانگر دستک کششی با رفتار محوری هستند، برای منظور کردن عملکرد کششی میانقاب مقاوم‌شده استفاده شده است.

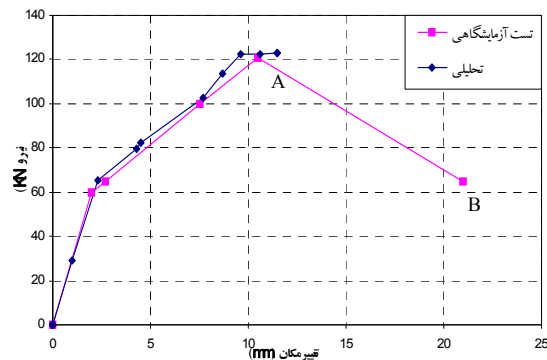


شکل ۸ نحوه مدل‌سازی میانقاب مقاوم‌شده با رفتار کششی و فشاری در قاب دوطبقه آزمایش شده





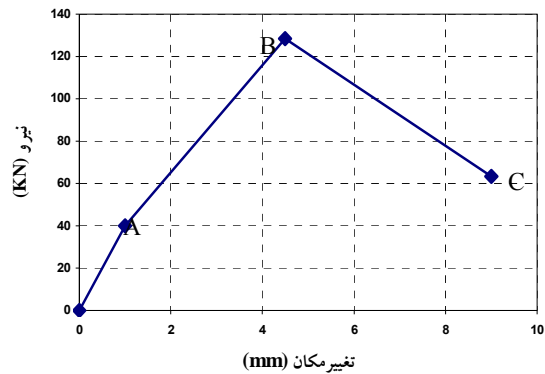
شکل ۱۱ منحنی رفتاری قاب با میانقاب مقاوم نشده



شکل ۱۲ منحنی رفتاری قاب با میانقاب مقاوم شده با پلیمرهای مسلح کربنی

همانطور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود، برای حالت مقاوم شده در بار ۶۰ کیلونیوتن، دستک‌های فشاری دچار شکست می‌شوند و کاهش ۵۰ درصدی در سختی رخ می‌دهد. در این زمان دستک‌های کششی به باربری ادامه داده و نمونه بار حداکثر ۱۲۰ کیلونیوتن را تحمل می‌کند. در ادامه نمونه بدون افزایش نیرو، تغییر مکان ۱۱ میلی‌متری را تجربه کرده و پس از آن تحلیل متوقف می‌شود. لازم است ذکر شود که نمی‌توان دوره آخر بارگذاری در آزمون‌های آزمایشگاهی را که پوش آن با خط رابط نقاط A و B نشان داده شده، رفتار واقعی سازه دانست، زیرا در این دوره نمونه دچار شکست می‌شود. با توجه به این توصیفات می‌توان گفت که مدل ارائه شده می‌تواند با تقریب قابل قبولی رفتار نمونه آزمایشگاهی را توصیف کند.

بنابراین بر اساس عملکرد آزمون‌های آزمایشگاهی مدل‌های تئوری باید از طرفی بیانگر رفتار کلی قاب بوده و از طرف دیگر، تأثیر عملکرد انکرها در آن دیده شود. پس از انجام تحلیل‌های متعدد برای تطابق کامل رفتار با آزمون‌های آزمایشگاهی، مدل رفتار سه‌خطی برای میانقاب مقاوم شده با پلیمر مسلح کربنی مطابق شکل (۱۰) به دست آمد.



شکل ۱۰ مدل دستک کششی قطری پیشنهادی

در این مدل نقطه A بیانگر اولین تسلیم در ماده کامپوزیت بوده و در این لحظه سختی کششی دستک افقی ۵۰ درصدی را تجربه می‌کند. در نقطه B اولین شکست در انکرها رخ می‌دهد که به‌طور کامل متناظر با بیشترین مقاومت محوری دستک است. لذا مدل با پارامترهای ۱- سختی اولیه، ۲- سختی پس از اولین تسلیم، ۳- سختی پس از مقاومت نهایی، ۴- بار تسلیم، ۵- بار شکست قابل تعریف است. تحلیل‌های متعددی برای تطابق کامل رفتار با تست‌های آزمایشگاهی انجام شد و در پایان مدل رفتاری نشان داده شده در شکل برای دستک‌های کششی به دست آمده است. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب رفتار قاب اولیه و قاب مقاوم شده را در آزمون‌های آزمایشگاهی و همچنین تحلیل‌ها نشان می‌دهد. شکست دستک فشاری و خارج شدن آن از باربری را می‌توان علت افت ناگهانی مقاومت در نمونه اولیه دانست (شکل ۱۱). البته در ساختمان‌های چندطبقه با تعداد بیشتری از دستک‌های مدل‌سازی شده، شدت افت مقاومت کمتر است، زیرا در عمل تمامی دستک‌ها به‌طور همزمان به شکست نمی‌رسند.

## ۹- نتیجه‌گیری

تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که میانقاب‌ها سبب افزایش قابل‌توجهی در سختی و مقاومت سازه شده و این باعث افزایش باربری سازه می‌شود. تحلیل‌های عددی که با نرم‌افزار DIANA انجام شده نشان می‌دهد که المان‌ها و مدل مصالح انتخاب شده می‌تواند رفتار قاب میان‌پر را با دقت قابل قبولی مدل‌سازی کند. همچنین از مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی و نتایج روشهای مختلف مدل‌سازی میانقاب، روش پیشنهادی El-Dakhakhni از توانمندی بالاتری در مدل‌سازی رفتار فشاری قطری میانقاب نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است. نتایج تحلیل‌های که بر روی قاب اولیه انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از مدل رفتاری ارائه شده برای دستک قطری فشاری می‌تواند رفتار واقعی سازه را با دقت قابل قبولی مدل‌سازی کند. همچنین در تحلیل با شکست دستک و در هنگام خارج شدن آن از باربری کاهش ۶۰ درصدی در مقاومت رخ می‌دهد. این کاهش با نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. اما از آنجا که در ساختمان‌های با تعداد بیشتری از میانقاب‌های مدل شده همه آنها به صورت همزمان به شکست نمی‌رسند لذا به نظر می‌رسد که افت مقاومت کمتری رخ دهد. تحلیل‌های انجام شده بر روی قاب مقاوم‌شده نیز نشان می‌دهد که مدل سه‌خطی ارائه شده برای دستک کششی و استفاده همزمان از دستک فشاری و کششی، توانسته است رفتار نمونه آزمایشگاهی را مدل‌سازی کند. همچنین این شیوه مقاوم‌سازی باعث افزایش سختی و مقاومت شده است.

## ۱۰- منابع

- [4] Canbay E., Ersoy U. and Ozcebe G.; "Contribution of reinforced concrete infills to seismic behavior of structural systems", Structural Journal, ACI; 2003, Vol.100, No.5, pp 637-643.
- [5] Pantelides C. P., Gergely J., Reaveley L. D., Volnyy V. A.; "Retrofit of RC bridge pier with CFRP advanced composites", J. of Structural Eng., ASCE; 1999, Vol.125, No.10, pp 1094-1099.
- [6] Triantafillou T. C.; "Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates"; Journal of Composites for Construction, ASCE; 1998, Vol.2, No.2, pp 96-104.
- [7] Albert M. L., Elwi A. E., Cheng J. J. R.; "Strengthening of Unreinforced Masonry Walls Using FRPs", Journal of Composites for Construction, ASCE; 2001, Vol.5, No.2, pp 76-83.
- [8] Al-Chaar G., Issa M. and Sweeney S.; "Behavior of masonry-infilled nonductile reinforced concrete frames", J. of Structural Eng., ASCE; 2002, Vol.128, No.8, pp 1055-1063
- [9] Erduran E., Keskin O. Mertol C.; "Strengthening of brick-infilled RC frames with CFRP", Departement of Civil Eng., Middle East Technical University, Ankara Turkey; March 2003, Report No. 06531.
- [10] DIANA, release 9.1., Division of Engineering Mechanics and Information Technology, TNO Building and Construction Research, Delft, The Netherlands, 2005.
- [11] Lourenco P. B.; "Computational Strategies for Masonry Structures", PhD thesis, Delft University of Technology, 1996.
- [12] Lourenco P. B., de Borst R., Rots J. G.; "A plane stress softening plasticity model for orthotropic materials", Int. J. Num. Meth.
- [13] Lourenco P. B.; "Two aspects related to the analysis of masonry structure: size effect and parameter sensitivity", Delft University of Technology; November 1997, Report No. 03.21.1.31.25.
- [14] Van Zijl G.; "Computational Modelling of Masonry Creep Shrinkage", PhD thesis, Delft University of Technology, 2000.
- [15] ElDakhakhni W. W., Elgaaly M., Hamid A. A.; "Three-Strut model for concrete masonry-infilled steel frames", J. Struct. Eng., Vol.129, No.2, pp 177-185.
- [۱۶] دهقانی ایوب، ناطق‌الهی فریبرز «مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از پلیمرهای فیبری مسلح (FRP)» سمینار کارشناسی ارشد مهندسی زلزله؛ پژوهشکده سازه؛ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله؛ ۱۳۸۵.
- [1] Erdem I., Akyuz U., Ersoy U., Ozcebe G.; "Experimental and analytical studies on the strengthening of RC frames", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver B.C., Canada; Paper No. 673, August 1-6, 2004,.
- [2] Ersoy U., Uzsoy S.; "The behavior and strength of infilled frames", Report No. MAG-205, TUBITAK, 1971, Ankara, Turkey.
- [3] Higashi Y. and Kokusho S.; "The strengthening method of existing reinforced concrete buildings", U.S.-Japan Cooperative Research Program in Earthquake Engineering, 1975; Honolulu, HI.