

بهسازی اجزاء و اتصالات پایه‌های قابی شکل بتن آرمه پل‌ها با بهره‌گیری از مواد کامپوزیت

اسلام سازمند^{1*}، شاهرخ مالک² و امیر ساعدی داریان³

¹ دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

² استادیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

³ دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
(تاریخ دریافت 85/6/25، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده 89/6/3، تاریخ تصویب 89/12/22)

چکیده

در این مقاله از طریق مدل‌سازی و تحلیل مدل اجزاء محدود، پایه قابی شکل¹ یک پل نمونه به منظور بهسازی مورد بررسی قرار داده شده‌است. برای مدل‌سازی بتن از المان سه بعدی هشت گرهی با قابلیت در نظر گرفتن ترک‌خوردگی در کشش و خردشدگی در فشار و برای مدل‌سازی آرماتورهای طولی از المان دو گرهی فشاری-کششی تک محوره استفاده شده‌است. آرماتورهای عرضی به صورت درصد حجمی در المان بتن منظور شده‌اند و برای مدل‌سازی مصالح کامپوزیت از المان سه بعدی هشت گرهی با خاصیت لایه‌ای استفاده شده‌است. در ابتدا مدل اجزاء محدود پایه قابی شکل پل در شرایط چون ساخت² و شرایط بهسازی شده ایجاد و نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشات پیشین مقایسه شده است. پس از اثبات صحت مدل عددی و روش تحلیل، با توجه به مشاهدات صورت گرفته از مدهای گسیختگی و نقاط ضعف چنین پایه‌هایی، مقاوم‌سازی پایه به کمک الیاف FRP در حالات متفاوت صورت گرفته‌است. بر اساس نتایج حاصله راهکارهایی جهت افزایش مقاومت نهایی و شکل‌پذیری پایه پل ارائه گردیده‌است.

واژه‌های کلیدی: روش اجزاء محدود، پایه قابی شکل¹، مصالح کامپوزیت FRP، بارگذاری مونوتونیک، ژاکت فولادی³، ژاکت بتنی⁴، ژاکت مصالح کامپوزیت⁵

مقدمه

الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند جزء اصلی باربر در کامپوزیت FRP محسوب می‌شوند. بسته به نوع فیبر، قطر آن در محدوده 5 تا 25 میکرون می‌باشد. رزین اصولاً به عنوان یک محیط چسباننده عمل می‌کند که فیبرها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد. با این وجود ماتریس‌های با مقاومت کم به صورت چشمگیر بر خواص مکانیکی کامپوزیت نظیر مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی آن اثر نمی‌گذارند. ماتریس (رزین) را می‌توان از مخلوط‌های ترموست و پاترموپلاستیک انتخاب کرد. ماتریس‌های ترمونت با اعمال حرارت، سخت شده و دیگر به حالت مایع یا روان در نمی‌آیند. در حالی که رزین‌های ترموپلاستیک را می‌توان با اعمال حرارت مایع نمود و با اعمال برودت به حالت جامد درآورد. از انواع رزین‌های ترموست می‌توان از پلی استر، وینیل استر، اپوکسی و از انواع رزین‌های ترموپلاستیک می‌توان از پلی وینیل کلرید (PVC) پلی اتیلن و پلی پروپیلن (PP) نام برد. کامپوزیت‌های FRP از قرار دادن الیاف پیوسته در ماتریس چسب، که الیاف را

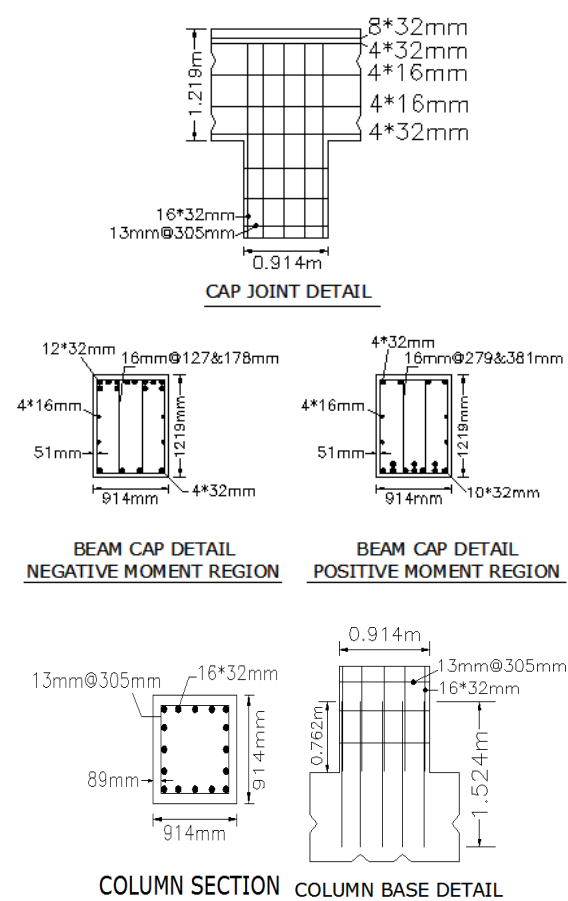
با توجه به لرزه‌خیزی کشور ایران از یک سو و اهمیت بالای پل‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزاء شریان‌های حیاتی کشور از سوی دیگر، مقاوم‌سازی و بهسازی پل‌ها و اطمینان نسبی از عملکرد مناسب آنها تحت بارهای جانبی از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به هزینه بالای انجام آزمایشات بر روی پلها، لزوم استفاده از یک روش عددی قابل اعتماد در مطالعه رفتار و مقاوم‌سازی پایه پل‌ها ضروری به نظر می‌رسد [1]. لذا در این مقاله ابتدا مدل ساخته شده از یک پایه قابی شکل¹ تحلیل شده و از مقایسه نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی همان نمونه، توانایی مدل در ارائه نتایج مطلوب به اثبات رسیده و سپس در مرحله بعد در حالات مختلف به بهسازی پایه قابی شکل به کمک الیاف FRP پرداخته شده است.

کامپوزیت‌های FRP

کامپوزیت‌های FRP از دو جزء اساسی تشکیل می‌شود: فیبر (الیاف) و رزین (ماده چسبنده). فیبرها که اصولاً

شده است. و از آنجایی که این پایه قابی شکل مشابه پایه‌های پلی بوده که در سال 1963، قبل از زلزله San Fernando (1971) ساخته شده بود، لذا جزئیات آرماتورگذاری برای عملکرد شکل پذیر را دارا نبوده است. بنابراین برای آزمایش دوم پایه قابی شکلی مشابه همان قاب اول ساخته شده و بعد از بهسازی با مصالح کامپوزیت مورد آزمایش قرار گرفته است.

در پل اصلی پایه‌های قابی شکل به فاصله 21/869 متر از همدیگر قرار گرفته‌اند. پایه قابی شکل شامل سه ستون و یک تیر سر ستون می‌باشد که نما، ابعاد و جزئیات پایه قابی شکل در شکل (1) نشان داده شده است [6].



شکل 2: جزئیات آرماتورگذاری ستون، تیر سر ستون و اتصالات [6].

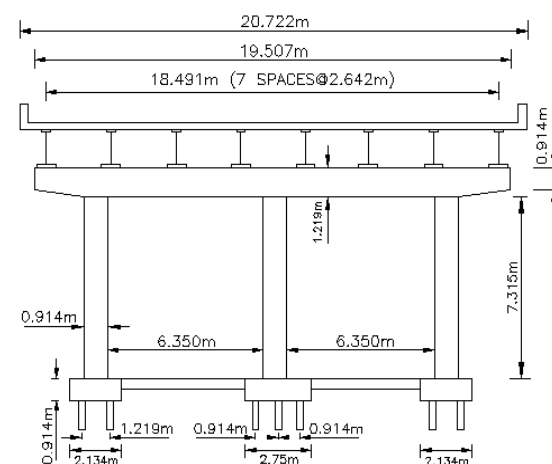
جزئیات آرماتورگذاری ستون، تیر سر ستون، اتصالات و ... نیز در شکل (2) نشان داده شده است [6].

همانطور که مشاهده می‌شود، ستونها بر روی سرشمع-هایی قرار گرفته‌اند که زیر سرشمع‌های کناری 4 عدد شمع و زیر سرشمع میانی 5 عدد شمع به طول 19/81

کنار هم نگه می‌دارد، ساخته می‌شوند. الیاف متداول عبارتند از الیاف کربن، الیاف شیشه، الیاف آرامید. با توجه به الیاف مورد استفاده، کامپوزیت‌های FRP به سه دسته تقسیم می‌شوند. کامپوزیت‌های پلیمر مسلح شده با الیاف شیشه (GFRP)، کامپوزیت‌های پلیمر مسلح شده با الیاف کربن (CFRP) و کامپوزیت‌های پلیمر مسلح شده با الیاف آرامید (AFRP) [2].

روش‌های مقاوم سازی اجزاء پایه قابی شکل بتن آرمه پل‌ها

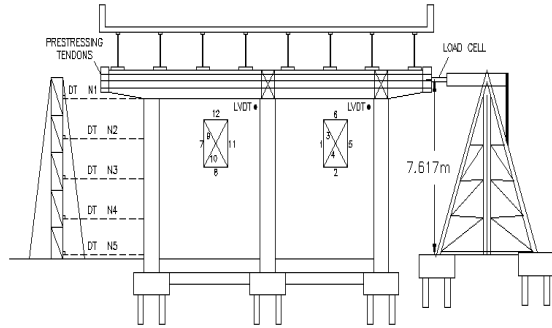
برای بهسازی اجزاء پایه قابی شکل¹ اعم از ستون، تیر سر ستون و اتصالات که عمدتاً در مقاومت خمشی و برشی ناشی از کمبود آرماتورهای برشی و طول ناکافی وصله پوششی در مفاصل پلاستیک دارای ضعف می‌باشند، روشهای متعددی موجود می‌باشد که از آن جمله می‌توان به استفاده از ژاکت فولادی³، ژاکت بتنی⁴، ژاکت مصالح کامپوزیت⁵ و یا بعضاً پیش تنیدگی⁶ اشاره کرد [3، 4، 5].



شکل 1: نما، ابعاد و جزئیات پایه قابی شکل [6].

معرفی پایه‌های قابی شکل آزمایش شده

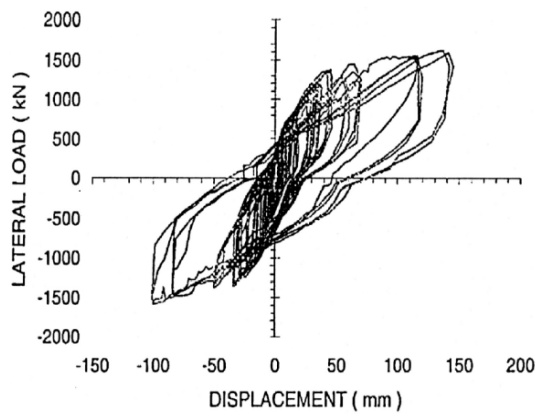
با توجه به هزینه بالای انجام تست‌های آزمایشگاهی تمام مقیاس در زمینه پایه‌های قابی شکل و دشواری‌های زیاد انجام این آزمایشات، چنین داده‌هایی محدود و بعضاً دور از دسترس می‌باشند. در این مطالعه یکی از معتبرترین آزمایشات در این زمینه انتخاب شده است. این آزمایشات توسط Pantelides و همکاران در دانشگاه Utah انجام شده است. نحوه انجام این آزمایشات به این ترتیب بوده است که در ابتدا قاب در شرایط چون ساخت آزمایش



شکل 4: اعمال بار جانبی و تجهیزات نصب شده [6].

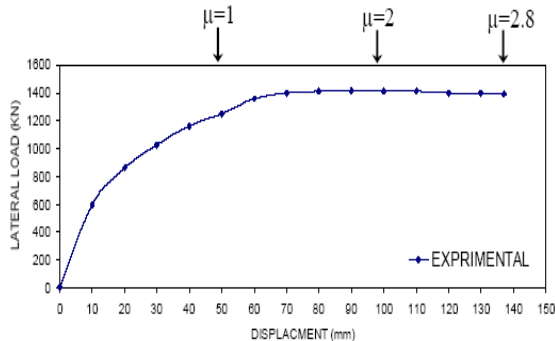
نتایج آزمایش قاب در شرایط چون ساخت

منحنی هیستریزس بار- تغییرمکان پایه قابی شکل آزمایش شده در شکل (5) نشان داده شده است [6].



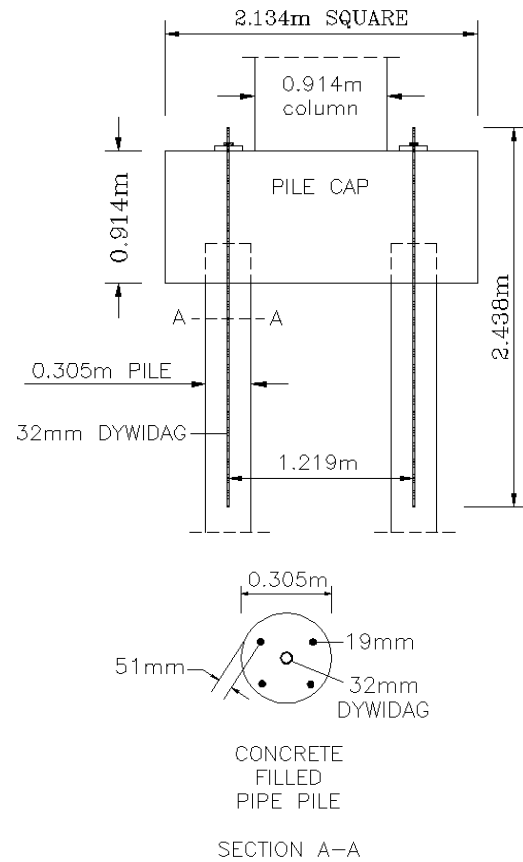
شکل 5: منحنی هیستریزس پایه قابی شکل، قبل از بهسازی [6].

با توجه به منحنی هیستریزس به دست آمده از آزمایش و در نظر گرفتن میانگین مقدار push و pull برای یک مقدار تغییرمکان از منحنی هیستریزس، منحنی بار جانبی- تغییرمکان به صورت زیر به دست آمده است (شکل 6).



شکل 6: منحنی بار جانبی- تغییرمکان قاب قبل از بهسازی.

متر وجود دارد و همچنین شرایط تکیه‌گاهی برای انجام آزمایشات قبل از گسیختگی زودرس فونداسیون، اصلاح شده است. که این کار با استفاده از مهار شمع‌ها و سرشمع با استفاده از میلگردهای با مقاومت بالا انجام شده است. جزییات و ابعاد شمع‌ها و سرشمع‌ها و میلگردهای مهاری در شکل (3) نشان داده شده است [6].



شکل 3: جزییات مهار شمع به سر شمع [6].

مشخصات مصالح مصرفی

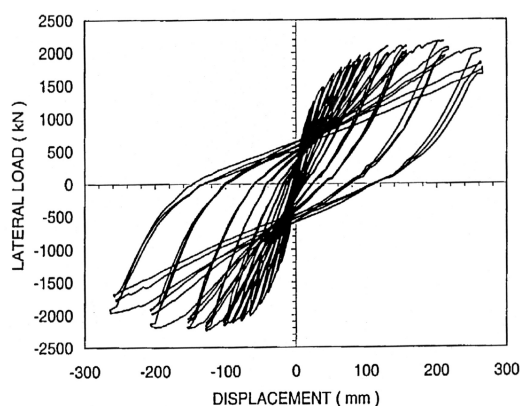
مقاومت بتن مصرفی برابر با 21 Mpa و آرماتورها دارای رفتار تنش-کرنش الاستوپلاستیک با تنش جاری شدن 275 Mpa می‌باشند [6].

شرایط آزمایش و نحوه اعمال بارها

هر کدام از هشت شاهتیر فولادی یک بار ثقلی 240 kN را تحمل می‌کنند و یک بار جانبی سیکلیک شبه استاتیکی در تراز تیر سر ستون و در 3 سیکل اعمال گردید. ابتدائاً تا جاری شدن آرماتورها، بار به صورت کنترل نیرو⁷ و بعداً با کنترل تغییر مکان⁸ اعمال گردید، که جزییات آن در شکل (4) نشان داده شده است [6].

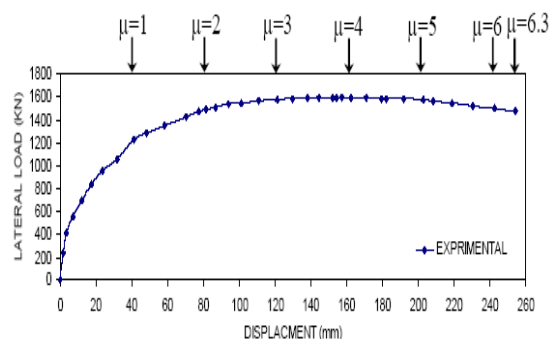
نتایج آزمایش قاب در شرایط بهسازی شده

منحنی هیستریزیس بار- تغییرمکان آزمایش قابی شکل بهسازی شده در شکل (8) نشان داده شده است [6].



شکل 8: منحنی هیستریزیس بار-تغییرمکان قاب بهسازی شده [6].

با توجه به منحنی هیستریزیس بدست آمده از آزمایش و در نظر گرفتن میانگین مقدار push و pull برای یک مقدار تغییرمکان از منحنی هیستریزیس، منحنی بار جانبی- تغییرمکان به صورت زیر به دست آمده است (شکل 9).



شکل 9: منحنی بار جانبی- تغییرمکان پایه قابی شکل بهسازی شده با کامپوزیت های CFRP.

نمودار بار جانبی- تغییرمکان هر دو پایه قابی شکل قبل از بهسازی و بهسازی شده به دست آمده از آزمایش، جهت مقایسه و مشاهده افزایش شکل پذیری و ظرفیت باربری در شکل (10) نشان داده شده است.

همان طور که در شکل (10) مشاهده می شود، شکل پذیری در پایه قابی شکل بهسازی شده به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده و ظرفیت باربری نیز افزایش یافته است.

معرفی پایه قابی شکل بهسازی شده

همان طور که ذکر شد قاب آزمایش شده دارای نقص هایی بوده است که به موجب این نواقص، عملکرد شکل پذیر در برابر بار جانبی از خود نشان نداده است. از جمله این نواقص می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- 1- محصور کنندگی ناکافی نواحی وصله پوششی ستون و نواحی مفاصل پلاستیک.
- 2- ظرفیت برشی ناکافی در ستون ها.
- 3- کمبود تنگها در نواحی اتصال تیر سرستون.
- 4- گیرداری ناکافی آرماتورهای طولی ستون که وارد تیر سرستون می شوند.

در نتیجه برای رفع نواقص ذکر شده، افزایش شکل پذیری و ظرفیت باربری، پایه قابی شکل با استفاده از کامپوزیت های CFRP بهسازی شده است [6].

مشخصات کامپوزیت های CFRP مصرفی

مشخصات کامپوزیت های CFRP مصرفی، اعم از مدول الاستیسیته، مقاومت کششی، کرنش محوری نهایی، ضخامت لایه و ... مطابق زیر می باشد.

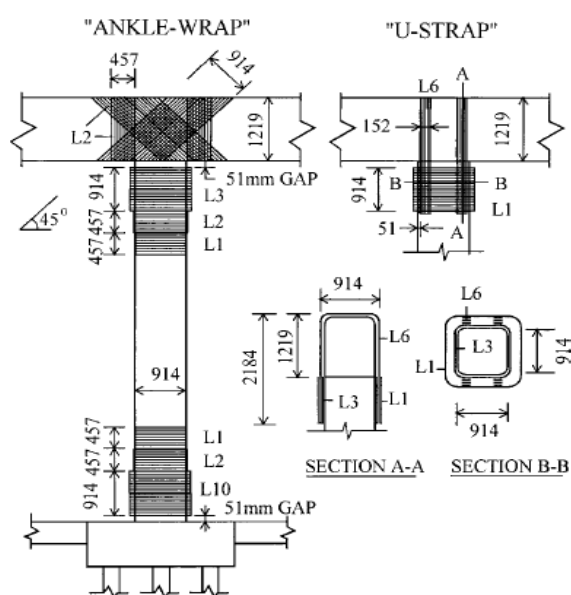
مدول الاستیسیته = 65 Gpa

مقاومت کششی = 628 Mpa

کرنش محوری نهایی = 10 mm/m

ضخامت لایه = 1.32 mm

جزئیات مربوط به شیت های FRP، شامل تعداد لایه ها و محل قرارگیری در شکل (7) نشان داده شده است [6].

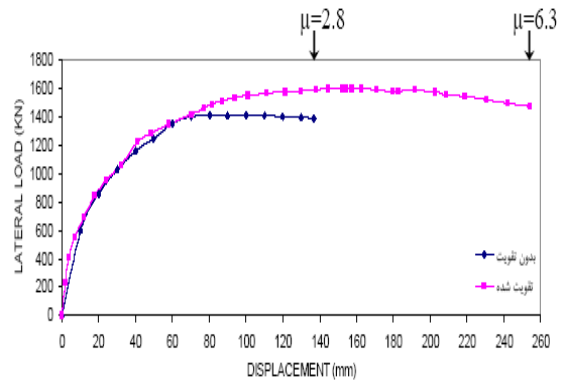


شکل 7: تعداد لایه ها و محل قرارگیری شیت های FRP [6].

ب- به علت عدم وجود اطلاعات از خاک منطقه و سختی شمع‌ها، پای ستون‌ها گیردار مدل شده است. (علیرغم اینکه در نمونه آزمایشی در زیر ستون‌ها، سرشمع و شمع وجود دارد، ولی به دلیل سختی زیاد سر شمع و شمع‌ها، خطایی که از فرض گیردار بودن پای ستون‌ها ایجاد می‌شود بسیار ناچیز می‌باشد).

همان‌طور که مشاهده می‌شود این فرضیات خللی در دقت و صحت نتایج ایجاد نکرده و صرفاً به منظور کاهش زمان مدل سازی و تحلیل صورت گرفته است. بار وارده به مدل مشابه بار اعمال شده در آزمایشات بوده و به همان محل نیز اعمال شده است.

کلیه اجزای اتصال از قبیل تیر و ستون توسط المان‌های درجه اول هشت گرهی SOLID65 مدل شده‌اند. این المان قابلیت ترک خوردن در کشش و خرد شدن در فشار را دارا می‌باشد و می‌تواند دارای آرماتور یا بدون آرماتور باشد. مورد اصلی استفاده از این المان در مدل نمودن بتن می‌باشد. این المان دارای هشت گره است که هر گره دارای سه درجه آزادی در جهات x ، y و z می‌باشد. این المان قابلیت تعریف آرماتور در سه راستا را داراست. با توجه به متقارن بودن نمونه و به منظور کاهش زمان مدل‌سازی، نصف نمونه مدل شده و سپس سمت دیگر با توجه به قابلیت‌های نمونه ایجاد شده است. به منظور مدل کردن آرماتورها از المان Link استفاده شده است. از این المان می‌توان به عنوان المان خرپا، فنر، رابط، کابل و ... استفاده کرد. این المان بصورت سه بعدی می‌باشد. المان تک محوره فشاری-کششی است و در هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی در جهات x ، y و z می‌باشد. این المان هیچ‌گونه خمشی را نمی‌پذیرد، و با توجه به ویژگی‌های آرماتورها بهترین گزینه جهت مدل‌سازی آنها می‌باشد. با توجه به پیچیدگی این مدل و حجم زیاد آرماتورها و خاموت‌های موجود در این نمونه‌ها، خاموت‌ها در این مدل به صورت درصد حجمی از المان بتن تعریف شده‌اند. لازم به ذکر است که مراجع متعددی این روش را جهت اعمال اثر خاموت‌ها در مدل و کاهش زمان مدل‌سازی و تحلیل ارایه کرده‌اند. در نمونه بهسازی شده الیاف پلیمری FRP به کمک المان SOLID46، مدل شده است. این المان مشابه المان SOLID45 است و اضافه بر آن دارای خاصیت لایه‌ای نیز می‌باشد. المان دارای هشت گره و سه درجه آزادی انتقالی در هر گره می‌باشد. برای مدل‌سازی



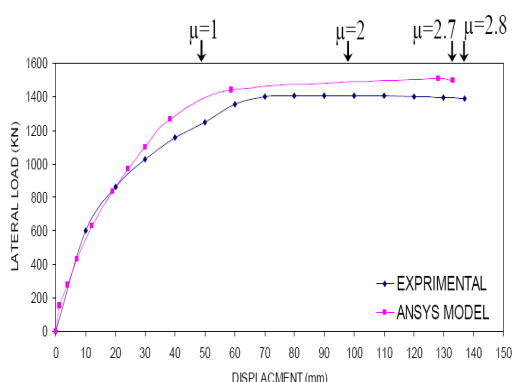
شکل 10: مقایسه منحنی بارجابنی - تغییر مکان آزمایشات انجام شده بر روی پایه قابی شکل قبل از بهسازی و بهسازی شده

مدل‌سازی عددی قاب با نرم افزار ANSYS

همان‌طور که اشاره شد با توجه به محدودیت‌های موجود در آزمایش‌های مربوط به پل‌ها و هزینه بالای چنین آزمایشاتی و همچنین با توجه به پیشرفت چشمگیر کامپیوترها در حال حاضر یکی از بهترین روش‌های مطالعه رفتار پل‌ها و بعضاً بهسازی آنها، استفاده از روش‌های عددی می‌باشد. در بین روش‌های عددی روش اجزاء محدود روشی قابل اطمینان و مناسب جهت مدل‌سازی و تحلیل چنین سازه‌هایی می‌باشد. البته باید توجه داشت که اولین نکته در استفاده از روش عددی اطمینان از صحت نتایج مدل ساخته شده می‌باشد. لذا در این مطالعه ابتدا دو آزمایش معرفی شده در بالا به دقت مدل‌سازی شده‌اند و سپس با مقایسه نتایج مدل‌ها با نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی و اطمینان از صحت عملکرد این روش در ادامه حالات مختلف بهسازی پایه قابی شکل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نرم افزار اجزای محدود ANSYS برای مدل‌سازی پارامتریک نمونه‌ها به کار رفته است. مدل‌های اجزاء محدود پارامتریک نمونه‌ها با استفاده از APDL ایجاد شده‌اند. با توجه به پارامتری بودن مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح، زمان ایجاد مدل‌های متفاوت به طور چشمگیری کاهش یافته است. مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن فرضیات زیر صورت گرفته است:

الف- چسبندگی بین هر نوع مصالح المان، کامل فرض می‌شود و هیچ‌گونه جابجایی⁹ میان بتن و آرماتور، میان بتن و شیشه‌های FRP و میان لایه‌های مختلف FRP در نظر گرفته نمی‌شود (تمامی گره‌های المان‌ها به همدیگر بسته¹⁰ شده‌اند).

منحنی بار جانبی - تغییر مکان مربوط به مدل عددی ساخته شده با نرم افزار در شکل (13) با منحنی مربوط به پایه قابی شکل آزمایش شده، مقایسه شده است.



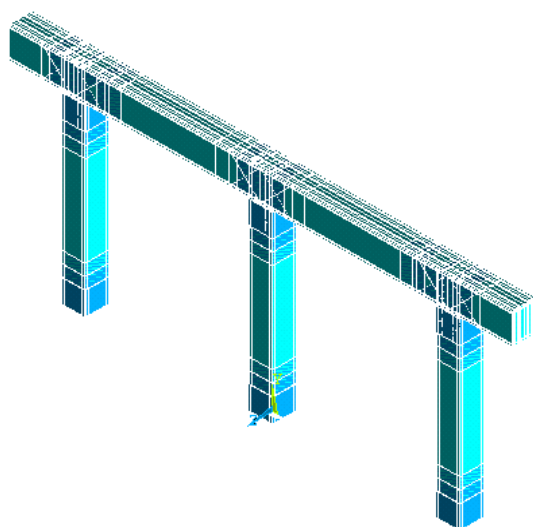
شکل 13: مقایسه منحنی‌های بار - تغییر مکان آزمایش با مدل عددی قاب، قبل از بهسازی.

همان‌طور که در شکل (13) مشاهده می‌شود با توجه به فرضیات صورت گرفته در مدل‌سازی، نتایج به دست آمده مطلوب و قابل قبول می‌باشد.

مدل‌سازی قاب بهسازی شده، نتایج آنالیز و مقایسه با آزمایش‌های انجام شده

شکل (14) نمای سه بعدی از مدل ساخته شده در وضعیت بهسازی شده را نشان می‌دهد، شیت‌های CFRP در شکل زیر به وضوح مشخص می‌باشد.

شکل (15) نمای سه بعدی از اتصال میانی مدل ساخته شده در وضعیت بهسازی شده را نشان می‌دهد، شیت‌های CFRP در شکل زیر به وضوح مشخص می‌باشد.

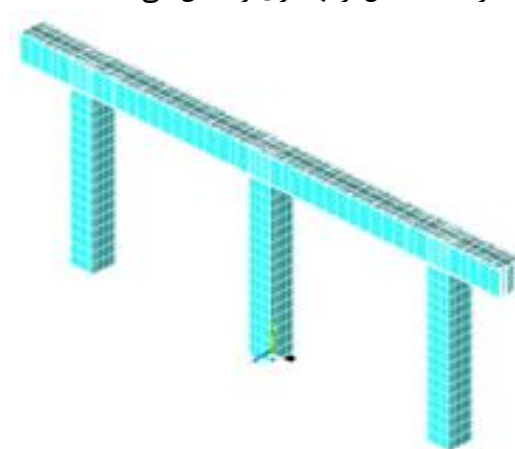


شکل 14: نمای سه بعدی از مدل پایه قابی شکل بهسازی شده.

پوسته‌های ضخیم لایه‌ای یا مواد لایه‌ای سه بعدی به کار می‌رود و تا 250 لایه با ضخامت یکسان در هر المان و 125 لایه با ضخامت متغیر به طور خطی در المان را می‌تواند مدل‌سازی کند. مصالح FRP به صورت شکننده رفتار می‌کنند و رابطه تنش-کرنش تا مرحله گسیختگی به صورت خطی می‌باشد. در این مطالعه فرض می‌شود که رابطه تنش-کرنش برای مصالح FRP به صورت الاستیک و خطی است.

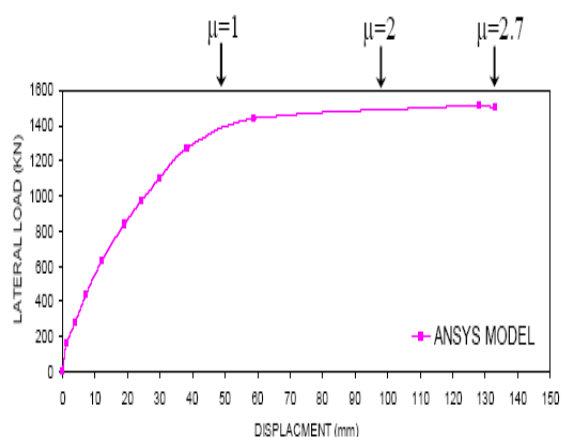
مدل‌سازی قاب قبل از بهسازی، نتایج آنالیز و مقایسه با آزمایشات انجام شده

شکل (11) نمای سه بعدی از المان‌های مدل ساخته شده در وضعیت قبل از بهسازی را نشان می‌دهد.

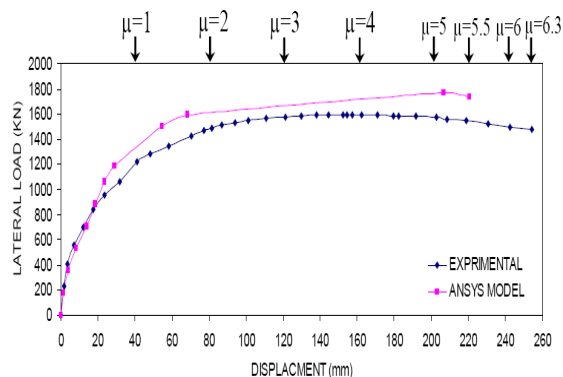


شکل 11: نمای سه بعدی از المان‌های مدل، قبل از بهسازی.

نتایج آنالیز پایه قابی شکل، قبل از بهسازی شامل منحنی نیرو جانبی - تغییر مکان جانبی در شکل (12) نشان داده شده است.



شکل 12: منحنی بار جانبی - تغییر مکان قاب، قبل از بهسازی.

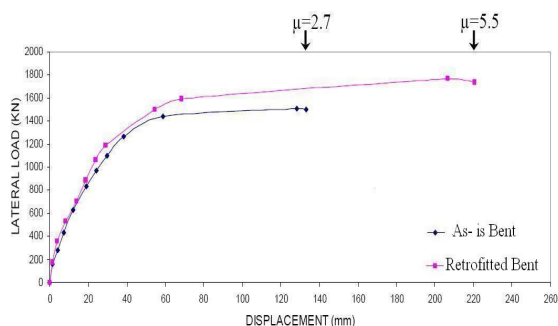


شکل 17: مقایسه منحنی‌های بار - تغییر مکان قاب بهسازی شده و مدل عددی.

مقایسه نتایج مدل‌سازی در دو حالت قبل از

بهسازی و بهسازی شده

نتایج به دست آمده از مدل‌سازی در دو حالت قبل از بهسازی و بهسازی شده، جهت مشاهده افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری، همانند نتایج به دست آمده از تست‌های انجام شده، در شکل (18) مقایسه شده است.

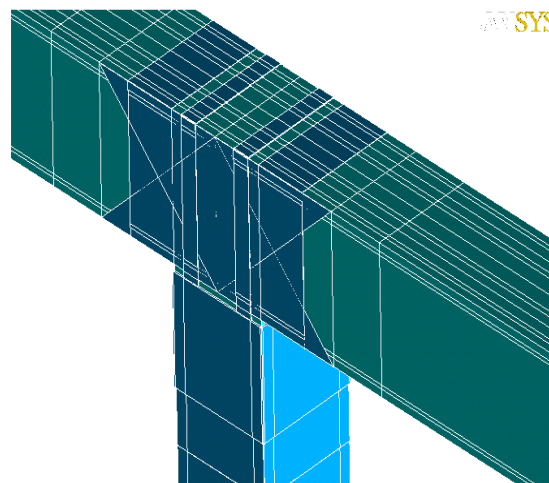


شکل 18: مقایسه منحنی بار جانبی - تغییر مکان مربوط به مدل‌سازی قاب قبل از بهسازی و بهسازی شده.

همان‌طور که در شکل (18) مشاهده می‌شود، همانند شکل (10) شکل‌پذیری در قاب بهسازی شده به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده و میزان شکل‌پذیری از 2/7 به 5/5 افزایش یافته و همچنین ظرفیت باربری نیز افزایش یافته است.

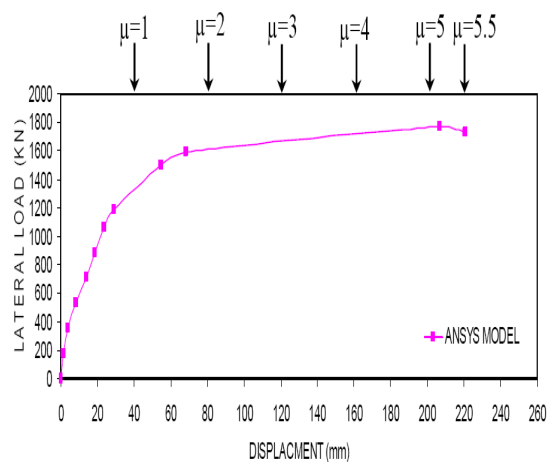
افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری جانبی قاب با استفاده مناسب از مواد کامپوزیت در اتصالات ستون به تیر سرستون قاب

در بخش‌های قبلی در مورد آزمایشات انجام شده بر روی پایه قابی شکل در حالات قبل از بهسازی و بهسازی شده بحث شد. با توجه به آزمایشات انجام شده مشاهده



شکل 15: نمای سه بعدی از اتصال میانی مدل قاب بهسازی شده.

نتایج آنالیز پایه قابی شکل بهسازی شده، شامل منحنی نیروی جانبی - تغییر مکان در شکل (16) نشان داده شده است.



شکل 16: منحنی بار جانبی - تغییر مکان قاب بهسازی شده.

منحنی بار جانبی - تغییر مکان مربوط به مدل عددی ساخته شده با نرم افزار در شکل (17) با منحنی مربوط به آزمایش قاب، مقایسه شده است.

همان‌طور که در شکل (17) مشاهده می‌شود، با توجه به فرضیات صورت گرفته در مدل‌سازی، همانند شکل (13)، نتایج به دست آمده مطلوب و قابل قبول می‌باشد.

توضیحاً اینکه در این حالت میزان مصرف مصالح کامپوزیت تغییر نمی کند و هدف از در نظر گرفتن این حالت، مشاهده میزان تاثیر افزایش عرض شیت های U شکل بدون تغییر در میزان مصرف مصالح کامپوزیت، در بهبود رفتار پایه قابی شکل می باشد.

(b) افزایش عرض شیت های U شکل به دو برابر عرض اولیه و با شش لایه

در این حالت میزان مصرف مصالح کامپوزیت در شیت های U شکل دو برابر شده است و هدف از در نظر گرفتن این حالت، مشاهده میزان تاثیر افزایش عرض شیت های U شکل به دو برابر حالت اولیه، ضمن افزایش میزان مصرف مصالح کامپوزیت، در بهبود رفتار پایه قابی شکل می باشد.

حالت (2)

در این حالت تقویت برشی اتصال با استفاده از شیت های افقی دو لایه بجای شیت های مورب که راستای فیبرها در جهت محور افقی تیر می باشد، انجام می شود. توضیحاً اینکه میزان مصرف مصالح کامپوزیت در دو حالت استفاده از شیت های مورب و استفاده از شیت های افقی یکسان در نظر گرفته شده است. که حالت دوم نیز به صورت های زیر قابل انجام می باشد:

(a) هیچ تغییری در عرض و تعداد لایه های شیت های U شکل صورت نگیرد. هدف از در نظر گرفتن این حالت، مشاهده میزان تاثیر شیت های افقی به جای شیت های مورب بدون هیچ گونه تغییری در شیت های U شکل می باشد و طبق توضیحات ارائه شده در بالا میزان مصرف مصالح کامپوزیت در این حالت نیز تغییری نمی کند.

(b) افزایش عرض شیت های U شکل به دو برابر عرض اولیه و با سه لایه

در این حالت هم میزان مصرف مصالح کامپوزیت تغییری نمی کند و هدف از در نظر گرفتن این حالت، مشاهده میزان تاثیر افزایش عرض شیت های U شکل به دو برابر حالت اولیه، ضمن ثابت نگه داشتن میزان مصرف مصالح کامپوزیت، در حالت استفاده از شیت های افقی به جای شیت های مورب در بهبود رفتار پایه قابی شکل می باشد.

(c) افزایش عرض شیت های U شکل به دو برابر عرض اولیه و با شش لایه

شد که مدهای گسیختگی کامپوزیت های FRP شامل پاره شدن شیت های U شکل در اتصال ستون به تیر سرستون و بلند شدن شیت ها از روی سطح بتن می باشد. لذا با توجه به این مشاهدات، جهت بهبود رفتار پایه قابی شکل و به تاخیر انداختن مدهای گسیختگی تقویت کننده های کامپوزیت، پیشنهاد کردیم که برای توزیع یکنواخت تنش و جلوگیری از تمرکز تنش در شیت های U شکل، عرض این شیت ها را افزایش دهیم و همچنین پیشنهاد کردیم که با استفاده از شیت های افقی بجای شیت های مورب در اتصال ستون به تیر سرستون، رفتار پایه قابی شکل را بهبود ببخشیم. زیرا استفاده از شیت های افقی به انتقال نیروهای کششی افقی ناحیه اتصال به عنوان بخشی از مکانیزم انتقال نیروی اتصال کمک می کند. لذا در این بخش با توجه به مدل عددی ارائه شده در بخش های قبل و تطابق این مدل با نتایج آزمایشات، به بهبود رفتار پایه قابی شکل با افزایش عرض شیت های U شکل و استفاده از شیت های افقی FRP به جای شیت های مورب می پردازیم. لازم به ذکر است که در آزمایشات انجام شده و مدل های بخش های قبل، شیت های U شکل دارای عرض 152 میلی متر و شش لایه که ضخامت هر لایه 1/32 میلی متر می باشد و شیت های مورب دارای دو لایه که ضخامت هر لایه 1/32 میلی متر می باشد. طبق توضیحات بخش های قبل، در بهسازی اولیه، شیت های U شکل به منظور جبران طول ناکافی آرماتورهای ستون که وارد تیر سرستون می شوند در نظر گرفته شده بودند و شیت های مورب جهت جبران کمبود آرماتورهای برشی اتصال طراحی شده بودند. لذا جهت بهبود رفتار پایه قابی شکل و به تاخیر انداختن مدل های گسیختگی تقویت کننده های کامپوزیت و پیشنهادات ارائه شده در این راستا، برای توزیع یکنواخت تنش و جلوگیری از تمرکز تنش در شیت های U شکل و بهبود انتقال نیروهای کششی افقی ناحیه اتصال، حالت های زیر در نظر گرفته شده است:

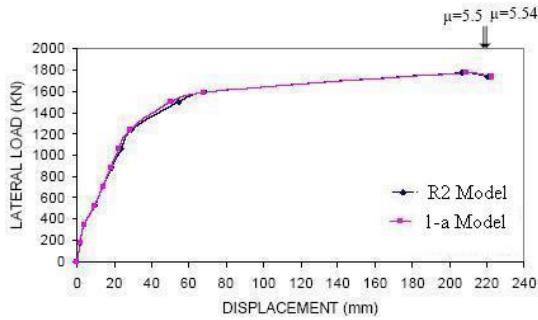
حالت (1)

در این حالت تقویت برشی اتصال با همان شیت های مورب قبلی صورت می گیرد، ولی عرض شیت های U شکل را به دو صورت زیر افزایش می دهیم:

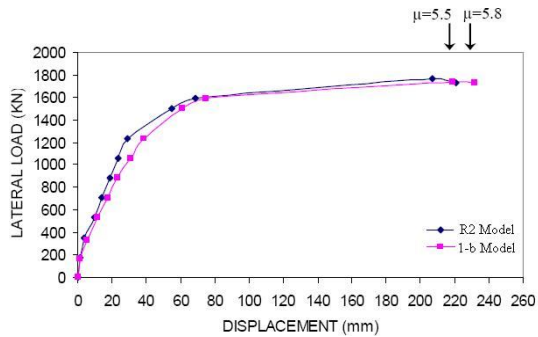
(a) افزایش عرض شیت های U شکل به دو برابر عرض اولیه و با سه لایه

نتایج را بررسی کنیم .

1-b) تقویت اتصال با شیت‌های مورب دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل شش لایه به دو برابر عرض اولیه: منحنی بار-تغییر مکان مدل 1-b در شکل زیر با منحنی مربوط به مدل R2 مقایسه شده است.



شکل 19: مقایسه منحنی بار جانبی-تغییر مکان مدل R2 و 1-a.



شکل 20: مقایسه منحنی بار جانبی-تغییر مکان مدل R2 و 1-b.

منحنی بار-تغییر مکان مدل 1-a، 1-b، R2 و T2 در شکل (21) با هم مقایسه شده است.

همان‌طور که از منحنی‌های بدست آمده در حالت (1) مشاهده می‌شود، مدل 1-b باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری قاب می‌شود و مقداری هم شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. یعنی با مصرف بیشتر مصالح کامپوزیت به میزان دو برابر حالت اولیه در شیت‌های U شکل، می‌توان ظرفیت باربری را به میزان قابل توجهی افزایش داد. در بخش بعدی به اثر استفاده از شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب می‌پردازیم.

2-a) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و شیت‌های U شکل با عرض و تعداد لایه‌های اولیه:

همان‌طور که قبلاً هم توضیح داده شد، هدف از در نظر گرفتن این حالت مشاهده میزان تاثیر شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب بدون هیچ‌گونه تغییری در شیت‌های U شکل می‌باشد و طبق توضیحات ارائه شده

در این حالت هم میزان مصرف مصالح کامپوزیت در شیت‌های U شکل دو برابر می‌شود و هدف از در نظر گرفتن این حالت، مشاهده میزان تاثیر افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر حالت اولیه، ضمن افزایش میزان مصرف مصالح کامپوزیت، در حالت استفاده از شیت‌های افقی بجای شیت‌های مورب در بهبود رفتار پایه قابی شکل می‌باشد.

جهت سهولت در مشاهده نتایج حالات ذکر شده و با توجه به توضیحات ارائه شده، پنج حالت فوق به صورت زیر خلاصه و نام‌گذاری می‌شوند:

1-a) تقویت اتصال با شیت‌های مورب دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل سه لایه به دو برابر عرض اولیه
1-b) تقویت اتصال با شیت‌های مورب دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل شش لایه به دو برابر عرض اولیه
2-a) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و شیت‌های U شکل با عرض و تعداد لایه‌های اولیه
2-b) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل سه لایه به دو برابر عرض اولیه
2-c) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل شش لایه به دو برابر عرض اولیه
لازم به ذکر است جهت مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایش قاب بهسازی شده، این دو حالت را به صورت زیر نام‌گذاری می‌کنیم:

T2: نتایج آزمایش پایه قابی شکل بهسازی شده
R2: نتایج مدل عددی پایه قابی شکل بهسازی شده اولیه در بخش‌های بعدی به بررسی نتایج و مقایسه هر کدام از حالات فوق الذکر می‌پردازیم.

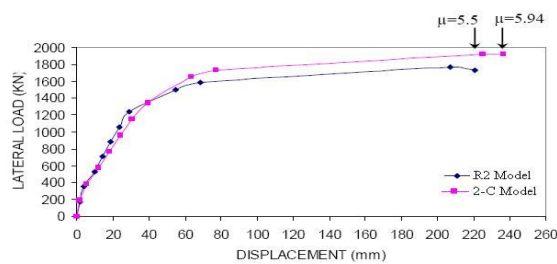
1-a) تقویت اتصال با شیت‌های مورب دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل سه لایه به دو برابر عرض اولیه: منحنی بار جانبی-تغییر مکان این حالت در شکل (19) با منحنی مربوط به مدل R2 مقایسه شده است.

همان‌طور که از شکل (19) مشاهده می‌شود، حالت 1-a تغییری در شکل‌پذیری و ظرفیت باربری پایه قابی شکل ایجاد نمی‌کند. یعنی اینکه افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر حالت اولیه ولی با سه لایه، علیرغم اینکه میزان مصرف مصالح کامپوزیت ثابت می‌ماند، تغییری در رفتار پایه قابی شکل ایجاد نمی‌کند. این موضوع ما را بر آن داشت که تعداد لایه‌های شیت‌های U شکل را مانند حالت اولیه برابر شش لایه در نظر بگیریم و

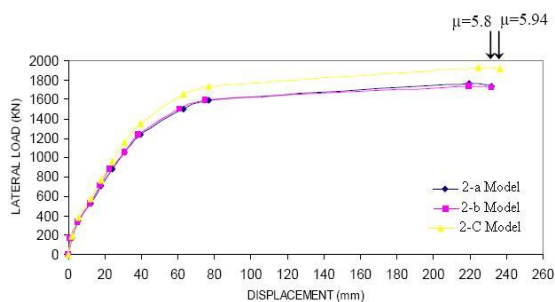
2-b) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل سه لایه به دو برابر عرض اولیه: منحنی مربوط به مدل 2-b در شکل زیر با منحنی مربوط به مدل R2 مقایسه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل 2-b، تقریباً مانند مدل 2-a می‌باشد و تغییری در ظرفیت باربری نهایی پایه قابی شکل ایجاد نمی‌کند. ولی شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. یعنی اینکه افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر حالت اولیه منتها با سه لایه، ضمن استفاده از شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب، علیرغم اینکه میزان مصرف مصالح کامپوزیت ثابت می‌ماند نسبت به حالتی که بدون تغییر در شیت‌های U شکل فقط از شیت‌های افقی بجای شیت‌های مورب استفاده کنیم، تغییری در رفتار پایه قابی شکل ایجاد نمی‌کند. این موضوع ما را بر آن داشت که تعداد لایه‌های شیت‌های U شکل را مانند حالت اولیه برابر شش لایه در نظر بگیریم و نتایج را بررسی کنیم.

2-c) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل شش لایه به دو برابر عرض اولیه: منحنی مربوط به مدل 2-c در شکل (24) با منحنی مربوط به مدل R2 مقایسه شده است. منحنی بارجانبی - تغییر مکان مدل 2-a، 2-b، 2-c در شکل (25) جهت مقایسه نشان داده شده است.

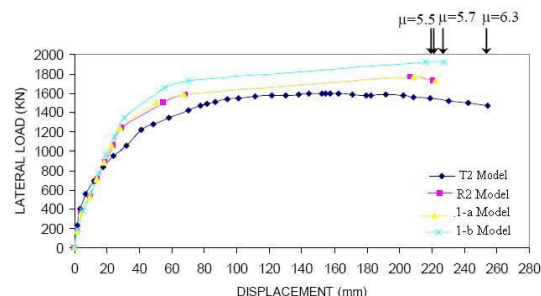


شکل 24: مقایسه منحنی بارجانبی - تغییر مکان مدل 2-c و R2.



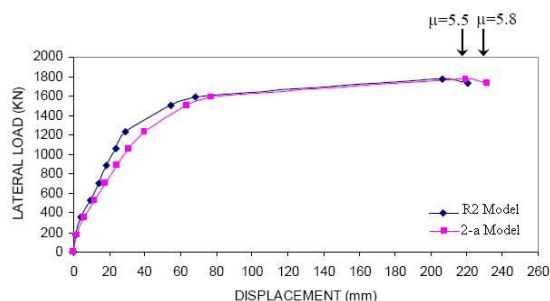
شکل 25: مقایسه منحنی بارجانبی - تغییر مکان مدل 2-a، 2-b و 2-c.

میزان مصرف مصالح کامپوزیت در این حالت تغییر نمی‌کند.

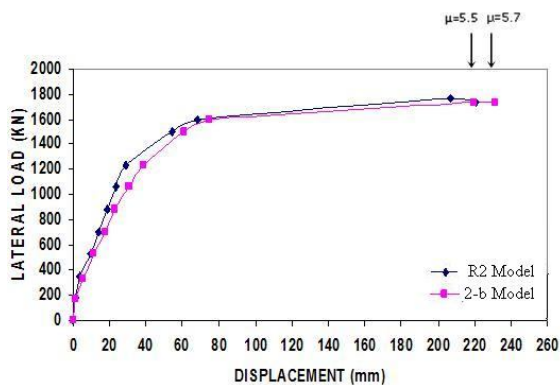


شکل 21: مقایسه منحنی بارجانبی - تغییر مکان مدل‌های 2-a، 2-b، 1-a، 1-b و R2.

منحنی مربوط به مدل 2-a در شکل زیر با منحنی مربوط به مدل R2 مقایسه شده است.



شکل 22: مقایسه منحنی بارجانبی - تغییر مکان مدل 2-a و R2.



شکل 23: مقایسه منحنی بارجانبی - تغییر مکان مدل 2-b و R2.

همان‌طور که از شکل (22) مشاهده می‌شود مدل 2-a تغییری در ظرفیت باربری نهایی پایه قابی شکل ایجاد نمی‌کند. ولی شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. یعنی اینکه استفاده از شیت‌های افقی بجای شیت‌های مورب ضمن اینکه میزان مصرف مصالح کامپوزیت ثابت می‌ماند، باعث افزایش شکل‌پذیری پایه قابی شکل می‌شود.

مدلی را خواهیم داشت که افزایش قابل توجهی در هر دو پارامتر ظرفیت باربری و شکل پذیری ایجاد می کند (مدل 2-c).

نتیجه گیری

در این بررسی ابتدا روش اجزاء محدود به عنوان یک روش قابل اطمینان و کارا در زمینه مدل سازی و تحلیل پایه پلها معرفی شده است و نحوه دقیق مدل سازی و تحلیل ارایه شده است و سپس در ادامه حالات مختلف بهسازی پایه پلها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل به صورت زیر دسته بندی شده اند :

1- استفاده از مصالح کامپوزیت جهت بهسازی عموماً باعث افزایش قابل توجه شکل پذیری و ظرفیت باربری پایه قابی شکل پل های بتن آرمه می گردد.

2- افزایش عرض شیت های U شکل به دو برابر عرض اولیه و با سه لایه (ثابت بودن میزان مصرف مصالح کامپوزیت) تاثیری در رفتار پایه قابی شکل پل های بتن آرمه ندارد.

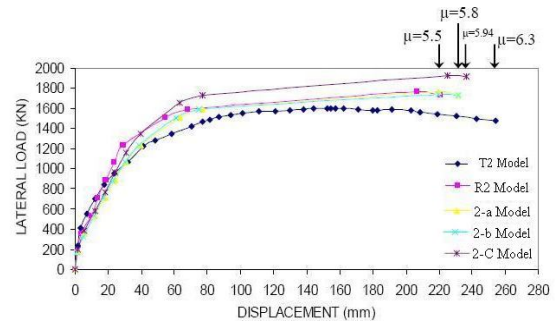
3- افزایش عرض شیت های U شکل به دو برابر عرض اولیه و با شش لایه (دو برابر شدن میزان مصرف مواد کامپوزیت در شیت های U شکل) باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری جانبی و تا حدودی شکل پذیری پایه قابی شکل می گردد.

4- استفاده از شیت های افقی به جای شیت های مورب در اتصال (ثابت بودن میزان مصرف مصالح کامپوزیت) باعث افزایش قابل توجه در شکل پذیری پایه قابی شکل پل های بتن آرمه می گردد و در ظرفیت باربری تاثیر چندانی ندارد.

5- نهایتاً جهت بهبود رفتار پایه های قابی شکل پل های بتن آرمه و افزایش شکل پذیری و ظرفیت باربری آنها پیشنهاد می گردد که در اتصال از شیت های افقی به جای شیت های مورب استفاده گردد و عرض شیت های U شکل نسبت به مقدار اولیه افزایش یابد (که در این مقاله عرض شیت های U شکل دو برابر مقدار اولیه در نظر گرفته شده است).

لازم به ذکر است که تمامی تحلیل های انجام شده با توجه به مشاهدات گزارش شده از آزمایشات، نوع جزئیات اجرایی تقویت اتصال و جریان تنشی موجود در اتصال، بدون در نظر گرفتن اثر جدایش لایه نازک بتنی مجاور

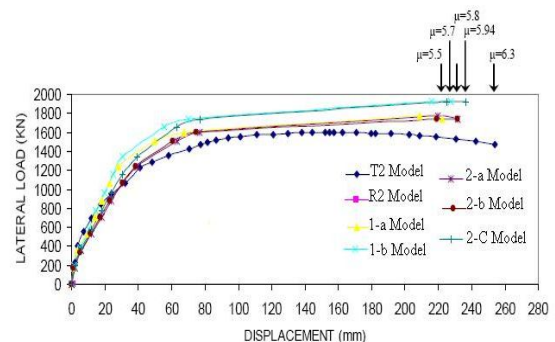
همان طور که در شکل (25) مشاهده می شود مدل 2-a و 2-b تقریباً مشابه می باشند ولی در مدل 2-c شکل پذیری و ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش یافته است، که این افزایش ها در شکل (26) در مقایسه با مدل R2 و T2 نشان داده شده اند.



شکل 26: مقایسه منحنی بار جانبی - تغییر مکان مدل 2-a، 2-b، 2-c، R2 و T2.

در شکل (26) نیز مشاهده می گردد که مدل 2-c نسبت به بقیه مدل ها افزایش شکل پذیری و باربری بیشتری را دارد و مناسب ترین گزینه می باشد.

و در نهایت جهت بحث و نتیجه گیری نهایی به مقایسه همه حالت های ذکر شده می پردازیم. همان طور که در شکل (27) ملاحظه می شود، استفاده از شیت های U شکل شش لایه به عرض دو برابر حالت اولیه (مدل 1-b)، باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری جانبی پایه قابی شکل می شود و تا حدودی هم شکل پذیری افزایش می یابد.



شکل 27: منحنی بار جانبی - تغییر مکان مدل 1-a، 1-b، 2-a، 2-b، 2-c، R2 و T2.

و همچنین استفاده از شیت های افقی به جای شیت های مورب (مدل 2-a) باعث افزایش قابل توجه شکل پذیری می گردد ولی ظرفیت باربری تغییر چندانی نمی کند. نتیجتاً اینکه اگر مدل 1-b و 2-a را با هم ترکیب کنیم

لایه چسب یا زوال پیوستگی¹¹ بوده که با نتایج آزمایشات افزایش دقت، قابل توصیه است که این اثر در مطالعات مرجع [6] تطابق مطلوبی داشته است، معذک برای آتی مد نظر قرار داده شود.

مراجع

- 1- Zamani Nejad, S. and Rahaee, A.R. (2004). *Performane Accesment of Strengthened Concrete Components with FRP and Compare to Carbon Fibers*, MSc. Thesis , Amir Kabir University.
- 2 - Matthews, and Rawlings, R. D. (1994). *Composite Materials Engineering and Science*, Chapman and Hall.
- 3 - Chai, Y. H., Priestley, M. J. N. and Seibel, F. (1991) "Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance." *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 5, September / October, PP. 572-584.
- 4 - Priestley, M. J. N., Seibel F. and fyfe, E. (1992). *Column Seismic Retrofit Using Fiberglass /Epoxy Jackets*, November, PP. 247-251.
- 5 - Priestley, M. J. N., Seibel, F. and fyfe, E. (1993) "Column Retrofit Using Priestesses Fiberglass / Epoxy Jackets." *Proceedings, 93 FIP Symposium*, Kyoto, Japan, October, PP.147-160.
- 6 - Pantelides, C. P. and Gergely, J. (2002). "Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Seismic Retrofit of RC Bridge Bent: Design and In Situ Validation." *Journal of Composites for Construction*, February.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Bent
- 2 - As built
- 3 - Steel jacket
- 4 - Concrete jacket
- 5 - Composite jacket
- 6 - Prestressing
- 7- Force-controlled
- 8 - Displacement-controlled
- 9 - Slippage
- 10- Merge
- 11- Debonding