

DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE CONSTITUTIVE MODEL FOR FRP- CONFINED CONCRETE ELEMENTS

E. Ghorbi

Master of science in earthquake engineering, Civil
Engineering Department, Tarbiat Modares
University: ehsan_ghorbi@yahoo.com

M. Soltani Mohammadi

Assistant professor in earthquake engineering, Civil
Engineering Department, Tarbiat Modares University:
msoltani@modares.ac.ir

Abstract: One of the most effective methods for seismic performance improvement of reinforced concrete (RC) elements is the external confinement by the wrapping of FRP sheets. As a result of FRP confinement, the constitutive model of concrete in compression i.e. the stiffness, compressive strength and ultimate strain of concrete can be completely changed. In this research the 3-dimensional nonlinear finite element program, COM3 (developed at the University of Tokyo) has been used for modeling of concrete samples confined with various amount of FRP. The effect of different parameters (stiffness, strength and thickness of FRP sheet) on the compression stress-strain curves of confined concrete is investigated. Through a numerical parametric study, the effect of confinement level on the Elasto-Plastic and Fracture (EPF) model (plastic strain and fracture parameter), is examined and based on which some equations for constitutive model are developed. In development of these equations, the effect of clear distance between FRP straps (incomplete confinement) is also considered. After modeling of the FRP-confined concrete specimens and verification of the analysis results with existing experimental samples, the effective parameters in the amount of FRP covers' confinement were determined through sensitivity analysis. The place of FRP rupture in mean compressive stress-strain curve is also determined by means of developing a relation for the circumferential strain of concrete specimen in terms of axial strain and confinement level.

توسعه مدل رفتاری فشاری بتن محصور شده با FRP

احسان قربی و مسعود سلطانی محمدی

چکیده: یکی از روش های مؤثر در بهبود عملکرد لرزه ای ستون های بتن مسلح، محصور نمودن آنها با ورق های FRP می باشد. در اثر محصورشدگی، مدل رفتاری بتن از جمله سختی، مقاومت فشاری و کرنش نهایی بتن تغییر می کند. در این تحقیق سعی شده است با مدل سازی نمونه های بتنی محصور شده با FRP، به کمک برنامه اجزاء محدود غیر خطی COM3 (توسعه یافته در دانشگاه توکیو) اثر پارامترهای گوناگون (سختی، مقاومت و ضخامت ورق های FRP) بر منحنی های تنش-کرنش متوسط فشاری بتن محاسبه گردد و تأثیر میزان محصورشدگی بر مشخصه های مدل رفتاری الاستو-پلاستیک و شکست (کرنش پلاستیک و پارامتر شکست) با یک مطالعه عددی مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت روابطی برای مدل رفتاری بتن تحت فشار به دست آید. در تعیین این روابط اثر فاصله آزاد میان نوارهای FRP (محصورشده ناکامل) لحاظ گردیده است. جهت منظور نمودن رفتار ارتجاعی-شکست FRP در تحلیل غیرخطی، اصلاحاتی در برنامه COM3 انجام گرفت و تا زمان گسیختگی FRP، مدل رفتاری الاستیک خطی برای دو راستای عمود برهم محلی که می تواند با مختصات کلی زاویه داشته باشد در المان FRP لحاظ گردید. پس از مدل سازی نمونه های بتنی محصور شده با FRP و

تاریخ وصول: ۸۵/۴/۱۰

تاریخ تصویب: ۸۷/۸/۲۲

احسان قربی، کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس. ehsan_ghorbi@yahoo.com

دکتر مسعود سلطانی محمدی، استادیار گروه مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس. msoltani@modares.ac.ir

اعتبارسنجی نتایج تحلیل با موارد آزمایشگاهی موجود، پارامترهای مؤثر در میزان محصورکنندگی پوشش‌های FRP تعیین گردید و از طریق مطالعه پارامتریک بر روی این پارامترها، اثر میزان محصورشدگی بر کرنش پلاستیک و پارامتر شکست به دست آمد. مطالعه پارامتریک نشان داده است کرنش پلاستیک وابسته به میزان محصورشدگی بتن نمی‌باشد، اما تغییرات پارامتر شکست در طول بارگذاری تناوبی و همچنین کرنش معادل محیطی نمونه محصور شده وابسته به میزان سختی محصورشدگی است. با توسعه رابطه‌ای برای کرنش محیطی بتن برحسب کرنش قائم و میزان محصورشدگی آن، محل گسیختگی FRP در منحنی تنش-کرنش متوسط فشاری تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: بتن، محصورشدگی، FRP، مدل رفتاری، روش اجزاء محدود.

۱. مقدمه

کاهش سطح عملکرد سازه‌های بتن‌آرمه تحت تاثیر عوامل محیطی از جمله خوردگی، و نیز آسیب‌های سازه‌ای ناشی از زلزله و همچنین وجود سازه‌هایی که ضعف اولیه در طراحی یا اجرا دارند، باعث شده که لزوم تدوین روش‌های علمی و اجرایی جهت تقویت و یا تعمیر اینگونه سازه‌ها احساس شود. یکی از روش‌های مؤثر جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتن مسلح، دورپیچ کردن آن با ورق‌های FRP است. مزیت‌های عمده مواد کامپوزیت (FRP) عبارتند از: مقاومت کششی بالا، داشتن رفتار الاستیک تا گسیختگی، مقاومت بالا در برابر خوردگی، وزن کم و سهولت نصب.

در اثر محصورشدگی، مدل رفتاری بتن تحت فشار (سختی، مقاومت فشاری و کرنش نهایی بتن) کاملاً تغییر می‌کند. در این مطالعه مدل سه بعدی المان محدودی بتن محصورشده با FRP ایجاد شد و با تغییر مشخصات FRP از جمله ضخامت، سختی و نیز فاصله ورق‌ها (در محصورشدگی ناکامل)، پاسخ مدل تحت بارگذاری رفت و برگشتی به دست آمد. تغییرات کرنش پلاستیک و سختی، در اثر شکست بتن اندازه‌گیری و در مدل دو بعدی الاستو-پلاستیک و شکست ارائه شده توسط اوکامورا و ماییکاوا [۱۱] به کار گرفته شد.

مدل‌هایی که در گذشته برای محصورشدگی با FRP توسعه داده شده‌اند را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود: دسته اول مدل‌های مبتنی بر محصورشدگی با فولاد هستند که این مدل‌ها توسعه یافته مدل‌های محصورشدگی با فولاد ریچارت و همکاران [۱]، نیومن [۲] و مندر و همکاران [۳] می‌باشند. اساس این روابط مقاومت نهایی در آزمایشات سه محوره می‌باشد، بنابراین چنین روابطی افزایش مقاومت بتن محصور شده را به صورت تابعی از فشار محصور کننده می‌دهند و فرض بر این است که فشار در تمام مدت ثابت است. مدل‌های فردیس و خلیلی [۴] و سعادت‌منش و همکاران [۵] جزء این دسته قرار می‌گیرند. در این مدل‌ها بیشترین فشار محصور کننده‌ای که FRP می‌تواند اعمال کند (فشار محصور کننده در زمان گسیختگی FRP)، جایگزین این فشار ثابت شده است. بسیاری از محققین معتقدند ایراد این مدل‌ها آن است که تفاوت عمده‌ای بین رفتار کششی فولاد و FRP در نظر گرفته نشده است

[۶]. طبق نظر این محققین، فرض فشار محصور کنندگی ثابت در حالت محصورشدگی با فولاد پس از مرحله جاری شدن صادق می‌باشد اما این فرض را نمی‌توان در مورد FRP توسعه داد زیرا FRP جاری نمی‌شود و فشار وارد بر هسته بتن تا زمان گسیختگی FRP به طور مداوم اضافه می‌گردد. دسته دوم مدل‌های تجربی می‌باشند که بهترین منحنی برازش شده بر نتایج آزمایش را به عنوان رفتار تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP معرفی نموده‌اند. در اکثر این مدل‌ها سعی شده است تنش و کرنش نهایی بیشترین انطباق را با آزمایشات داشته باشند. مدل‌های میاوچی و همکاران [۸]، گنو و همکاران [۹] و سامان و همکاران [۶] از این نوع می‌باشند. دسته سوم مدل‌های محاسباتی هستند که از این نوع مدل‌ها می‌توان به مدل اسپولسترا [۷] اشاره نمود.

مدل‌هایی که در گذشته ارائه شده‌اند عموماً تاثیر تمام پارامترهای مؤثر را در نظر نمی‌گیرند و برای حالت خاص رفتار یکنوا توسعه یافته‌اند و فاقد قابلیت مدل‌سازی رفتار هیسترسیس کامل نمونه بتنی محصور شده می‌باشند. در این مطالعه سعی شده است که با استفاده از مدل رفتاری الاستو-پلاستیک و شکست (EPF¹) که شامل منحنی پوش و حلقه‌های درونی می‌باشد، مدل بتن محصور شده با FRP ارائه گردد. از مزیت‌های این مدل آن است که جزء کرنش پلاستیک و پارامتر شکست که به ترتیب معرف رفتار پلاستیک و تغییرات سختی نمونه می‌باشند، به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و به سادگی به حالت رفت و برگشت توسعه داده شده است.

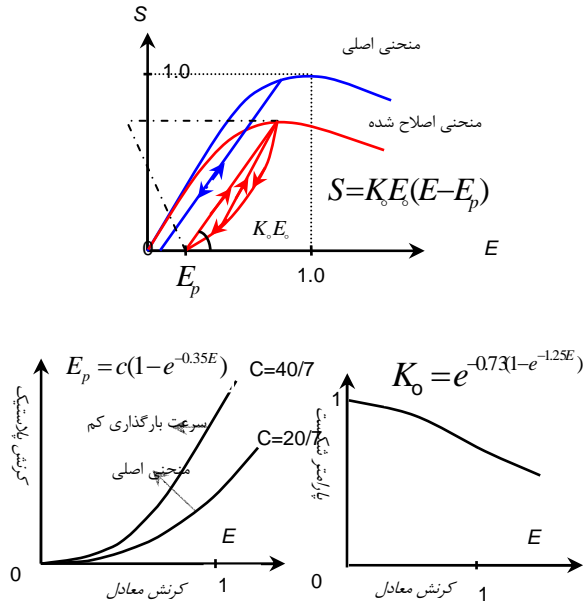
۲. مدل الاستو-پلاستیک و شکست (EPF)

در مدل الاستو-پلاستیک و شکست رابطه کرنش و تنش معادل بر اساس مدول الاستیک اولیه، پارامتر شکست و تنش پلاستیک معادل به دست می‌آید (شکل ۱). کرنش پلاستیک معادل عبارت است از کرنش در زمانی که تنش به صفر می‌رسد و پارامتر شکست،

¹ Elasto-Plastic and Fracture

² Average Stress

³ Deviation Stress



شکل ۲. کرنش پلاستیک معادل، پارامتر شکست و تنش معادل بر حسب کرنش معادل

۳. نحوه مدل سازی و اعتبارسنجی مدل

هدف از این تحقیق دستیابی به مدل رفتاری بتن محصور شده با FRP از طریق مطالعه پارامتریک بر روی عوامل مؤثر در محصورکنندگی ورق‌های FRP است. در راستای نیل به این هدف از برنامه‌المان محدود غیر خطی سه بعدی COM3 (توسعه یافته در دانشگاه توکیو [۱۱]) استفاده شده است. لذا در ابتدا لازم است که قابلیت این برنامه در مدل‌سازی بتن محصور شده، از طریق قیاس با نتایج آزمایشگاهی به اثبات برسد.

۳-۱. بتن محصور شده با خاموت

برای نشان دادن قابلیت برنامه COM3 در مدل‌سازی بتن محصور شده، نخست به بررسی نتایج تحلیل برای بتن محصور شده با خاموت پرداخته شده است. در این قسمت از نتایج آزمایش چونگ و همکاران [۱۳] به‌عنوان معیار اعتبارسنجی استفاده شده است. این آزمایش با هدف تعیین رابطه‌ای تجربی برای تنش-کرنش ستون بتنی محصور شده، بر روی نمونه‌های مربعی با ابعاد ۲۰ cm انجام گرفته است. در این آزمایش ارتفاع ستون‌ها ۶۰ cm و ضخامت بتن پوشش ۱/۷ cm در نظر گرفته شده‌اند و از سه نوع بتن L، M و H (نمونه‌های L8S5.5E3، M8S5.5E5.5 و H8S5.5S5.5) با مقاومت‌های فشاری به ترتیب ۲۰۰ kg/cm² و ۳۹۰ kg/cm² و ۵۴۰ kg/cm² استفاده شده است. تنش جاری شدن فولادهای طولی و خاموت‌ها به ترتیب ۴۲۰۰ kg/cm² و ۵۵۰۰ kg/cm² بوده‌اند. مشخصات مقاطع و نیز طریقه مدل‌سازی آنها در شکل آمده است.

کاهش مدول الاستیک را در پروسه باربرداری و بارگذاری مجدد نشان می‌دهد. تا زمانیکه کرنش معادل از محدوده ماکزیمم کرنش‌های قبلی تجاوز ننموده، کرنش پلاستیک معادل و پارامتر شکست تغییر نمی‌کنند.

تنش معادل متغیری است که میزان تنش مؤثر در حالت تنش دو بعدی را ارائه می‌دهد و به‌صورت تابعی از تنش میانگین^۲ و تنش انحرافی^۳ تعریف می‌شود. کرنش معادل نیز میزان کرنشی را می‌دهد که به‌وسیله کرنش میانگین و کرنش انحرافی به‌دست می‌آید [۱۱]:

$$S = \sqrt{\left(\frac{0.6}{f'_c} \sigma_m\right)^2 + \left(\frac{1.3}{f'_c} \tau_d\right)^2} \quad (1)$$

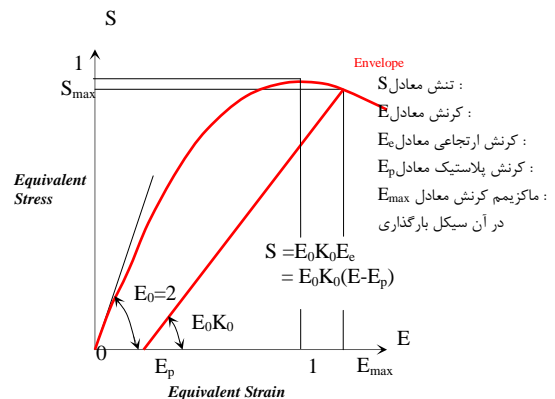
$$\sigma_m = \sqrt{2} \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad \text{و} \quad \tau_d = \sqrt{2} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

σ_1 و σ_2 تنش‌های اصلی ($\sigma_1 \geq \sigma_2$)، τ_d ، σ_m ، f'_c و S به ترتیب تنش میانگین، تنش انحرافی، تنش فشاری ماکزیمم و تنش معادل هستند.

$$E = \sqrt{\left(\frac{0.62}{\epsilon'_{co}} \epsilon_m\right)^2 + \left(\frac{0.98}{\epsilon'_{co}} \gamma_d\right)^2} \quad (2)$$

$$\gamma_d = \sqrt{2} \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \quad \text{و} \quad \epsilon_m = \sqrt{2} \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$$

ϵ_1 و ϵ_2 کرنش‌های اصلی ($\epsilon_1 \geq \epsilon_2$)، ϵ_m ، γ_d ، ϵ'_{co} و E به ترتیب کرنش میانگین، کرنش انحرافی، کرنش متناظر با f'_c و کرنش معادل هستند. پارامتر شکست و کرنش پلاستیک معادل برای بتن محصور نشده بر حسب ماکزیمم کرنش کل، طبق نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده است [۱۰]. کرنش پلاستیک معادل برخلاف پارامتر شکست کاملاً وابسته به سرعت بارگذاری (نرخ کرنش) می‌باشد (شکل ۲). روابط اساسی شکست و پلاستیسیته تحت شرایط تنش سه محوره، در مرجع [۱۰] قابل پیگیری است.



شکل ۱. رابطه تنش-کرنش معادل [۱۱]

در شکل ۴ برای بتن پرمقاومت (نمونه H8S5.5S5.5) که مقدار خاموت کمتری نیز دارد، در دو ناحیه، افت ناگهانی مقاومت مشاهده می‌شود. این پدیده که در مدل اجزاء محدود اتفاق افتاده و در آزمایش مشاهده نمی‌شود، ناشی از گسیختگی المان‌های خاموت است و می‌تواند به علت خطا در گزارش تنش جاری شدن خاموت باشد.

۳-۲. بتن محصور شده با ژاکت فولادی

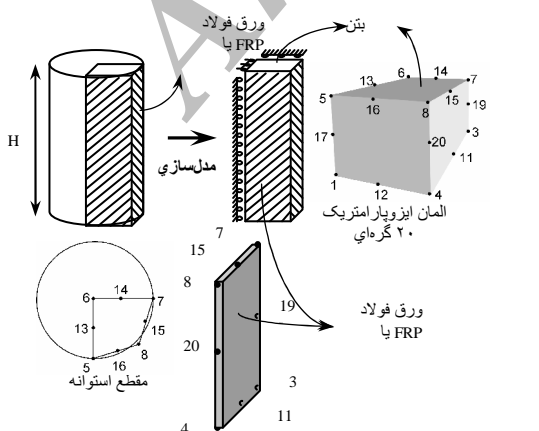
برای اعتبارسنجی مدل بتن محصور شده با فولاد از نتایج آزمایش گیاکوملیس و همکاران [۱۵] استفاده شده است. این آزمایش به مطالعه رفتار محوری تیوپ‌های فولادی پر شده با بتن پرداخته است. مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی نمونه‌ها و خواص مکانیکی مصالح

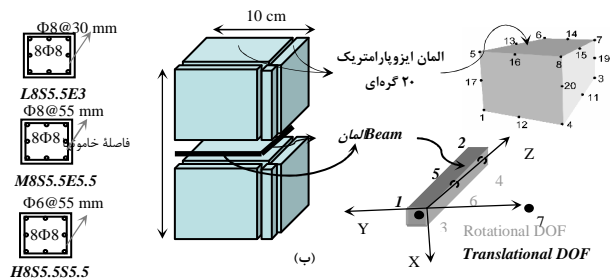
[۱۵]

نمونه	تنش جاری شدن فولاد (kg/cm ²)	مقاومت فشاری بتن (kg/cm ²)	ارتفاع نمونه (cm)	ضخامت ورق فولاد (cm)	قطر خارجی تیوپ (cm)
C9	۳۶۵۰	۵۷۶	۳۰/۰۵	۰/۵۰۲	۱۱/۵۰
C11	۳۴۳۰	۵۷۶	۳۰/۰۰	۰/۳۷۵	۱۱/۴۳

اگر محصورشدگی با خاموت را به علت فاصله آزاد بین دو محصورکننده (فاصله خاموت‌ها) از نوع محصورشدگی ناکامل بنامیم، شباهت محصورشدگی با ورق‌های فولادی و FRP جدا از اختلاف رفتار این دو ماده، در کامل بودن آنها است. شکل ۶ روش مدل‌سازی استوانه بتنی محصور شده با ورق فولاد یا FRP را توضیح می‌دهد. با توجه به تقارن، یک چهارم نمونه با اعمال شرایط مرزی مناسب مورد تحلیل قرار گرفته است. تفاوت مدل‌سازی محصورشدگی با فولاد و FRP تنها در مدل رفتاری این دو نوع محصور کننده است.

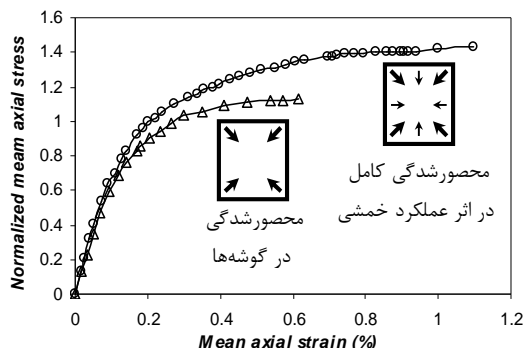


شکل ۶. مدل‌سازی نمونه استوانه‌ای محصور شده

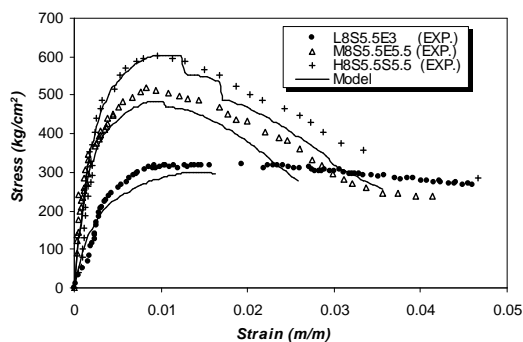


شکل ۳. (الف) مشخصات نمونه‌های آزمایش (ب) مدل‌سازی نمونه مکعبی محصور شده با خاموت

مطابق شکل ۳، یک چهارم از مقطع ستون مربع شکل، در ارتفاع فاصله بین دو خاموت، توسط ۸ المان ایزوپارامتریک ۲۰ گره‌ای و نیز دو المان یک بعدی Beam مدل گشته است. المان‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی خاموت، المان‌هایی با مقطع دایره می‌باشند که هم سختی محوری دارند و هم سختی خمشی. سختی این المان‌ها باعث می‌شود که محصورکنندگی خاموت در تمام طول آن انجام گیرد و منحصر به گوشه‌های نمونه بتنی نگردد. شکل ۴ تفاوت این دو نوع محصورشدگی را در آزمایش پالیواتا و همکاران [۱۴] نشان می‌دهد. مقایسه نتایج آزمایش و تحلیل به صورت منحنی تنش- کرنش محوری در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۴. تفاوت محصورشدگی در گوشه‌ها و محصورشدگی به علت عملکرد خمشی خاموت [۱۴]



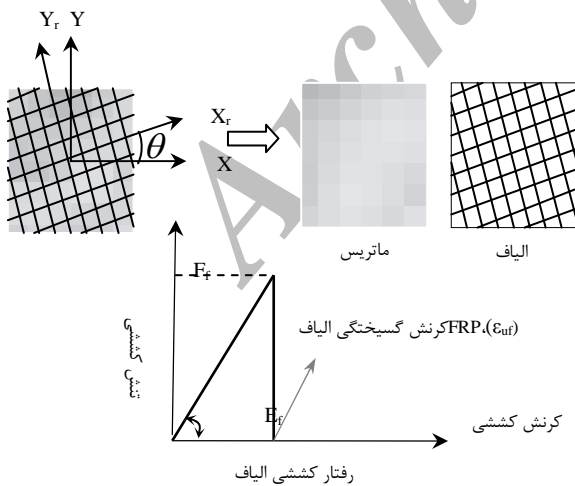
شکل ۵. مقایسه تنش-کرنش محوری مدل المان محدود و آزمایش [۱۳]

نحوه مدل‌سازی این نمونه‌ها همانند بتن محصور شده با فولاد (مطابق شکل ۶) بوده است. نمونه بتنی با المان سه بعدی *Solid* و ورق FRP با المان *Plate* که شامل مشخصات FRP از جمله مدول الاستیسیته، کرنش گسیختگی و راستای الیاف بوده است، مدل گشته‌اند. درجات آزادی چرخشی گره‌های المان *Plate* بسته شده و سازگاری تغییرشکلی المان‌های *Plate* و *Solid* فقط به صورت انتقالی منظور شده است.

از آنجائیکه نرم‌افزار در ابتدا قابلیت مدل‌سازی FRP را نداشت برای این قسمت، اصلاحاتی در برنامه ایجاد شد و از این طریق مدل‌سازی FRP در برنامه امکان‌پذیر گشت.

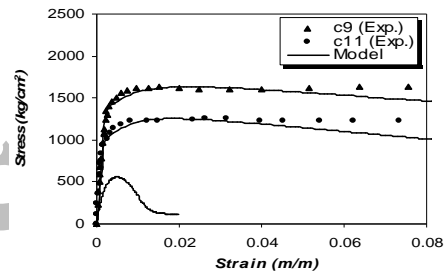
المان FRP به صورت صفحه‌ای متشکل از یک ماتریس ضعیف و نیز الیاف پخش شده در راستای مورد نظر مدل شده است که الیاف مسلح کننده ماتریس، رفتار محوری ارتجاعی-خطی دارند (شکل ۹). بدین ترتیب با تعیین کرنش در نقاط گوسی المان برای راستای الیاف و با توجه به رفتار کششی آنها (شکل ۹)، تنش الیاف به دست می‌آید. تنش کل المان حاصل جمع تنش الیاف و ماتریس است که مورد اخیر با توجه به تعریف مدول ارتجاعی پایین برای ماتریس، مقدار اندکی می‌باشد.

مدل نمودن تماس لایه‌های FRP با بتن به کمک المان *Joint*⁴ انجام گردید. این المان با تعریف سختی چسبندگی میان دو لایه مدل‌سازی تماس بتن و FRP را ممکن می‌سازد. البته به دلیل آنکه در این مطالعه نمونه‌های بتنی محصور شده تحت تأثیر نیروی فشاری خالص بودند و انبساط هسته بتنی تنش فشاری را بین دو سطح (بتن و FRP) ایجاد می‌نمود، جداشدگی بتن و FRP مود خرابی حاکم بر نمونه‌های بررسی شده نبوده است.



شکل ۹. مدل‌سازی المان FRP

مطابق شکل ۶، از یک المان ایزوپارامتریک سه بعدی به عنوان تقریبی از یک چهارم استوانه بتنی استفاده شده است. ورق‌های فولادی نیز توسط دو المان صفحه‌ای، به سطوح خارجی بتن اضافه شده‌اند. المان مورد استفاده در مدل‌سازی ورق فولاد، یک المان ایزوتروپ می‌باشد که رفتار الاستو-پلاستیک دارد. از آنجایی که در آزمایش، ورق فولادی ژاکت در باربری قائم نمونه سهمیم بوده است، در مدل‌سازی نیز تمهیدی برای جلوگیری از اعمال بار قائم به ورق فولاد در نظر گرفته نشده است. نتایج تحلیل اجزاء محدود برای رفتار محوری بتن محصور شده با ورق فولادی، انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایش دارد (شکل ۷).

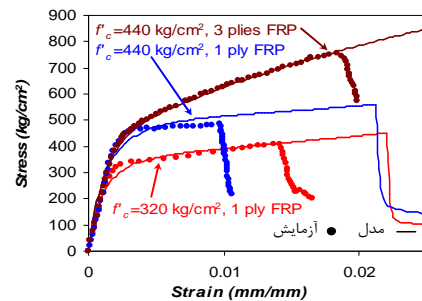


شکل ۷. مقایسه تنش-کرنش محوری مدل المان محدود و آزمایش [۱۵]

۳-۳. بتن محصور شده با FRP

شکل ۸ مقایسه نتایج مدل تحلیلی و آزمایشات دیمرز و نیل [۱۶] را نشان می‌دهد. این آزمایشات بر روی استوانه‌های بتنی با قطر ۱۵ cm و ارتفاع ۳۰ cm انجام شده است. ضخامت CFRP استفاده شده ۰/۳۴ cm و مقاومت آن ۳۸۰ kg/cm² بوده است. مقاومت بتن استفاده شده ۳۲۰ kg/cm² و ۴۴۰ kg/cm² و مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آن به ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۳×۱۰^۶ kg/cm² بوده است. ورق‌های FRP در آزمایش کشش، کرنش نهایی ۱/۶٪ را نشان داده‌اند. با توجه به مقادیر ذکر شده، مدول ارتجاعی ورق‌های کامپوزیت از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

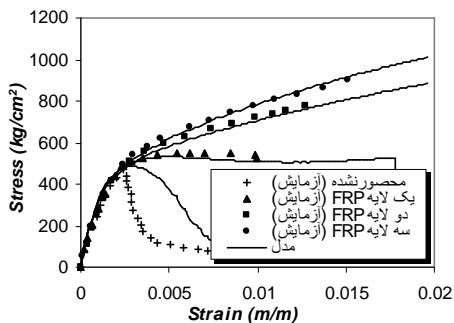
$$E_f = \frac{F_f}{t} \frac{1}{\varepsilon_f} = 0.7 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (3)$$



شکل ۸. مقایسه نمودار تنش-کرنش محوری در مدل المان محدودی و نتایج آزمایش [۱۶]

⁴ Interface Joint Element

برخی از محققین از جمله ماتیس [۱۸] رابطه‌ای را برای این ضریب ارائه داده‌اند و برخی دیگر نیز بازه‌ای را برای آن در نظر گرفته‌اند. شکل ۱۰ مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایش بردت و همکاران [۱۹] را نشان می‌دهد. در این آزمایش از استوانه‌های بتنی با مقاومت‌های 200 kg/cm^2 و 400 kg/cm^2 استفاده شده است. قطر استوانه‌های بتنی 16 cm و ارتفاع آنها 32 cm بوده‌اند. نمونه‌های بتنی با FRP‌های پرمقاومت دورپیچ شده‌اند. در این آزمایش پوشش‌های CFRP و GFRP در ۲ تا ۱۲ لایه مورد استفاده قرار گرفته است. مدول الاستیک برای CFRP و GFRP به ترتیب $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و $0.74 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و مقاومت کششی آنها به ترتیب $32 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$ و $25 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$ بوده است. در تمام موارد الیاف‌ها در راستای عمود بر محور ستون قرار داشته‌اند که راستای صفر درجه (0°) نامیده می‌شود. روش مدل‌سازی مانند مورد قبلی می‌باشد (شکل ۶). شکل ۱۱ مقایسه بین رفتار فشاری بتن محصور شده را در آزمایش زیانو و یو [۲۰] و مدل تحلیلی نشان می‌دهد.



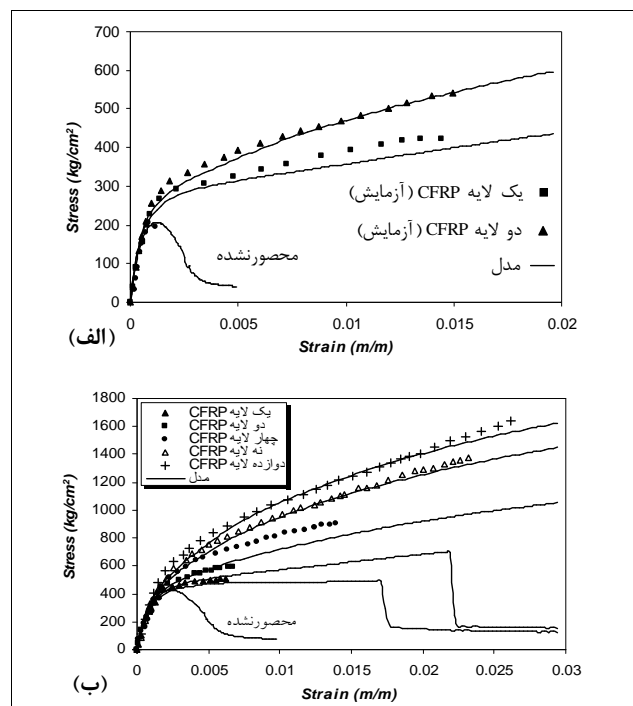
شکل ۱۱. تنش-کرنش محوری مدل المان محدود و آزمایش [۲۰].

این آزمایش با هدف بررسی منحنی‌های تنش-کرنش محوری بتن محصور شده با FRP بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر $15/2 \text{ cm}$ و ارتفاع 30 cm انجام گرفته است. برای نمونه محصور نشده، مقاومت فشاری بتن 470 kg/cm^2 اندازه‌گیری شده و محصورکننده‌ها از نوع CFRP بوده‌اند که مدول ارتجاعی و مقاومت نهایی آنها به ترتیب $0.78 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و $12/42 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$ برآورد شده است. ورق‌های CFRP با ضخامت $0/056 \text{ cm}$ در ۱ تا ۳ لایه به دور نمونه‌های بتنی پیچیده شده‌اند.

برای نمونه محصور نشده در رفتار نرم‌شدگی بتن، اختلافی بین مدل و آزمایش وجود دارد. این اختلاف ناشی از اثر اندازه (Size effect) است و معمولاً در رفتار فشاری نمونه‌هایی که ارتفاع بیش از 20 cm دارند مشاهده می‌شود.

آزمایش دیگری که جهت اعتبارسنجی مدل بتن محصور شده با FRP مورد استفاده قرار گرفته، آزمایش کارابینس و همکاران [۲۱]

مطابق شکل ۷، نتایج تحلیل المان محدود در مقادیر مختلف محصورشدگی انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد. موردی که نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر تفاوت دارند، محل گسیختگی FRP می‌باشد. بسیاری از مشاهدات پژوهشگران [۱۷] نشان می‌دهد که کرنش کششی نهایی الیاف ژاکت قبل از گسیختگی بطور مشخص کمتر از کرنش نهایی الیاف در طی آزمایشات کشش (آزمایشی که جهت مشخص کردن تنش تسلیم الیاف بکار می‌رود) می‌باشد. این پدیده که گسیختگی زودرس FRP نامیده می‌شود به دلایل زیر اتفاق می‌افتد: اولاً الیاف در آزمایش کشش در معرض بارهای محوری قرار می‌گیرند اما در ژاکت علاوه بر بارهای محوری، بارهای عرضی نیز وجود دارند، ثانیاً بتن محصورشده در معرض تمرکز تنش قرار داشته و منجر به شکست الیاف در کرنش‌های کمتر می‌گردد. دلیل دیگر این اختلاف، تفاوت پدیده گسیختگی ورق FRP در مدل المان محدود و مدل آزمایشگاهی می‌باشد؛ در مطالعه عددی زمانی گسیختگی FRP اتفاق می‌افتد که تنش در کل ضخامت ورق FRP به تنش نهایی برسد، اما در عمل اگر قسمتی از ورق FRP دارای مقاومت کمتری باشد، گسیختگی از آنجا شروع شده و به سایر قسمت‌ها منتقل می‌شود. برای لحاظ نمودن این پدیده در مدل رفتاری، "ضریب کاهش" به صورت نسبت کرنش محیطی در زمان گسیختگی به کرنش نهایی به دست آمده از کشش تک‌محوره FRP تعریف می‌گردد.



شکل ۱۰. مقایسه تنش-کرنش محوری در مدل المان محدودی و نتایج آزمایش [۱۹]
 $f_c = 200 \text{ kg/cm}^2$; (الف) و $f_c = 400 \text{ kg/cm}^2$ (ب)

۴. مدل محصورشدگی

هدف از این مطالعه اصلاح مدل رفتاری بتن^۵ در اثر محصورشدگی با FRP بوده است. بدین منظور نمونه‌های استوانه‌ای بتن با مقادیر مختلف FRP به کمک برنامه COM3 مدل گشته و با یک مطالعه پارامتریک اثر میزان محصورشدگی بر روی مدل رفتاری بتن تعیین شد.

۴-۱. پارامترهای مؤثر در محصورکنندگی FRP

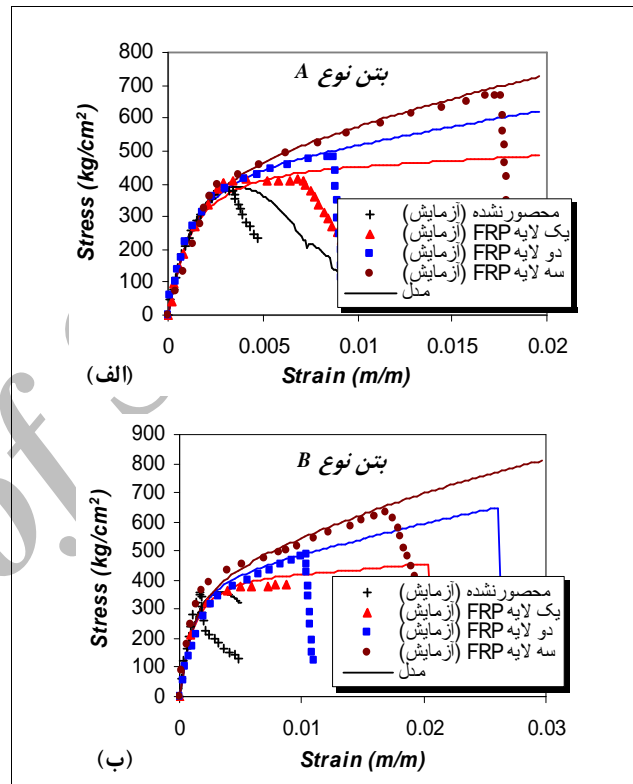
پارامترهای متعددی در بررسی اثر محصورکنندگی پوشش‌های FRP بر روی بهبود مدل‌های رفتاری بتن تحت فشار مؤثر است که از جمله می‌توان به سختی (E_f)، مقاومت (F_f)، ضخامت (t) و درصد حجمی پوشش‌های FRP (ρ) اشاره نمود. لذا در ابتدا لازم است که پارامترهای مؤثر در میزان محصورکنندگی پوشش‌های FRP تعیین گردد و سپس با یک مطالعه پارامتریک بر روی این متغیرها، اثر میزان محصورشدگی بر تغییرات جزء کرنش پلاستیک و پارامتر شکست به دست آید. جهت تعیین پارامترهای مؤثر در میزان محصورشدگی، از روش آنالیز حساسیت استفاده شده است. بدین ترتیب که پاسخ محوری بتن در اثر تغییرات پارامترهای مختلف محصورشدگی با انجام تحلیل‌های متعدد به دست آمده و با بررسی این نتایج پارامترهای مؤثر تعیین گشته‌اند. در تعیین پارامترهای مؤثر حالت‌های زیر در نظر گرفته شد:

- اثر ابعاد نمونه.
- اثر تغییرات ابعاد و ρ در حالی که E_f و ρF_f ثابت هستند.
- اثر تغییرات E_f در نمونه‌هایی با ρF_f ثابت.
- اثر ضخامت ورق FRP.
- اثر پارامتر $E_f t/r$.
- اثر پارامترهای ρF_f ، $E_f t/r$ و F_c .

با بررسی نتایج به دست آمده از هر یک از این قسمت‌ها اثر آن پارامتر بر منحنی تنش-کرنش متوسط بتن و نیز مشخصه‌های مدل رفتاری الاستو-پلاستیک و شکست (کرنش پلاستیک و پارامتر شکست) بررسی شد و در نهایت پارامترهای مؤثر در میزان محصورشدگی بتن با FRP تعیین گشت؛ این پارامترها عبارتند از: ρF_f و $E_f t/r$ که E_f سختی ورق FRP در راستای محیطی، t ضخامت FRP، r شعاع استوانه بتنی محصورشده، ρ درصد حجمی FRP و F_f تنش نهایی FRP می‌باشند.

توضیحات کامل‌تر این بخش در مرجع [۲۳] موجود می‌باشد. بررسی رفتار بتن با تغییر پارامترهای مؤثر در میزان محصورشدگی (ρF_f و $E_f t/r$) نشان می‌دهد که پارامتر $E_f t/r$ تعیین کننده رفتار بتن محصورشده است و پارامتر ρF_f محل قطع شدن FRP را نشان می‌دهد (شکل ۱۳).

می‌باشد. در این آزمایش که هدف آن مطالعه رفتار فشاری بتن محصور شده با FRP بوده، از کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف کربن (CFRP) استفاده شده است. دو نوع نمونه بتنی A و B با مقاومت‌های فشاری به ترتیب 385 kg/cm^2 و 357 kg/cm^2 به صورت استوانه‌هایی با قطر ۲۰ cm و ارتفاع ۳۲ cm ساخته شده‌اند. مدول ارتجاعی بتن نمونه‌های A و B به ترتیب $0.245 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و $0.235 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشند.



شکل ۱۲. مقایسه نمودار تنش-کرنش محوری مدل المان محدود و آزمایش [۲۱]

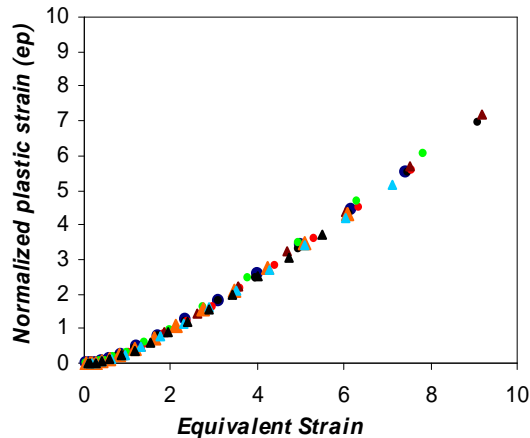
این نمونه‌های بتنی با ۱ تا ۳ لایه از ورق‌های FRP که مشخصات آن در جدول آمده است، محصور گشته‌اند. راستای الیاف ورق FRP در جهت عمود بر محور طولی نمونه‌ها بوده‌اند.

جدول ۲. خواص مکانیکی ورق CFRP [۲۱]

ضخامت (cm)	مدول ارتجاعی (kg/cm^2)	کرنش گسیختگی (mm/mm)	مقاومت نهایی (kg/cm^2)
۰/۰۱۱۷	$2/4 \times 10^6$	۰/۰۱۵۵	$2/4 \times 10^6 \times 0/۰۱۵۵ = 37200$

شکل ۱۲ مقایسه نتایج تحلیل و همچنین آزمایش را برای بتن‌های نوع A و B نشان می‌دهد. تفاوت نتایج این آزمایش با مدل اجزاء محدود، مانند نمونه‌های قبل در محل گسیختگی FRP می‌باشد.

^۵Elasto-Plastic and Fracture model (EPF)



شکل ۱۵. بررسی اثر میزان محصورشدگی بر روی کرنش پلاستیک

شکل ۱۵ نیز همانند نتایج آزمایش (شکل ۱۴) تأکید بر این مطلب دارد که کرنش پلاستیک متأثر از میزان محصورشدگی نمی‌باشد. بنابراین با استفاده از نتایج به‌دست آمده (شکل ۱۵) رابطه‌ای مستقل از میزان محصورشدگی برای کرنش پلاستیک معادل به‌دست آمد:

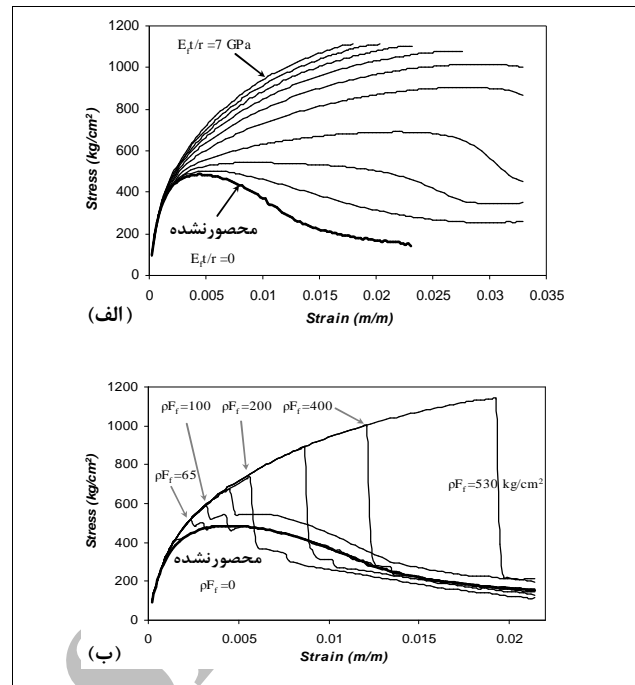
$$e_p = e_{\max} - \frac{17}{7} (1 - e^{-0.35e_{\max}}) \quad (4)$$

در این رابطه e_{\max} بیشترین کرنش معادل (کرنش محوری بتن که با کرنش متناظر با تنش ماکزیمم بتن محصور نشده، نرمالایز شده است) در سیکل بارگذاری مربوطه می‌باشد.

۴-۳. پارامتر شکست

در این قسمت از تحقیق سعی شده است تا اثر میزان سختی محصورشدگی (E_f/t) بر روی نحوه تغییرات پارامتر شکست (k_0) در طول بارگذاری تناوبی نمونه بتن محصور شده با FRP تعیین گردد. برای دستیابی به این هدف، نمونه استوانه‌ای به همراه مقادیر مختلفی از FRP مطابق شکل ۶ مدل گردید. سپس برای هر مقدار از سختی محصورشدگی، این نمونه بتنی تحت بارگذاری تناوبی تا مقادیر بالایی از کرنش قائم (حدود ۲٪) قرار داده شد.

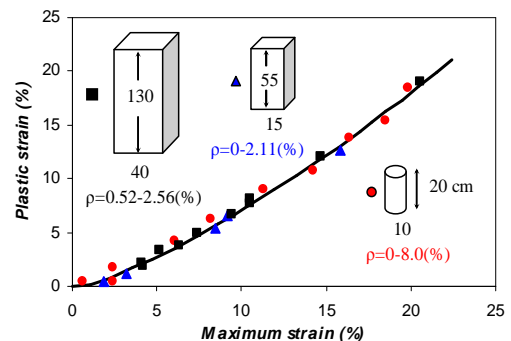
شکل ۱۶ منحنی تنش-کرنش متوسط نمونه بتنی را برای بارگذاری تناوبی در مقادیر مختلف محصورشدگی نشان می‌دهد. با توجه به شیب مسیرهای بارگذاری مجدد و نیز سختی اولیه، منحنی تغییرات پارامتر شکست در طول پروسه بارگذاری و باربرداری، برای هر میزان از سختی محصورشدگی مطابق شکل ۱۷ به‌دست می‌آید.



شکل ۱۳. نمودار تنش-کرنش محوری (الف) برای مقادیر مختلف ج و (ب) برای مقادیر مختلف ρF_f در E_f/t ثابت

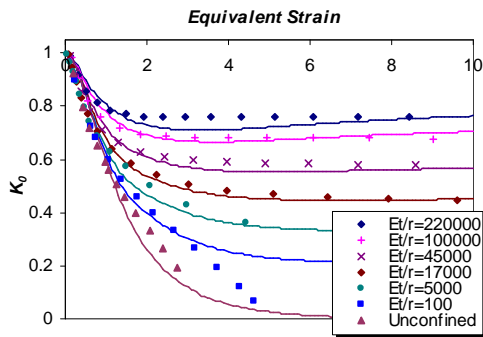
۴-۲. کرنش پلاستیک معادل

تحقیقات گذشته از جمله پالواتا و همکاران [۱۴] نشان می‌دهد که کرنش پلاستیک بستگی به میزان محصورشدگی بتن ندارد. آنها با آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی محصور شده با مقادیر مختلفی از خاموت نشان دادند که شکل مقطع و میزان محصورشدگی تأثیری در جزء کرنش پلاستیک ندارد (شکل ۱۴). برای نشان دادن این مطلب در محصورشدگی با FRP، نمونه استوانه‌ای با مقادیر مختلفی از محصورشدگی مدل گردید و با اعمال بارگذاری تناوبی نمودار تنش-کرنش رفت و برگشتی آن به‌دست آمد. سپس منحنی تغییرات کرنش پلاستیک برحسب کرنش قائم برای مقادیر مختلف از سختی محصورشدگی مطابق شکل ۱۵ ترسیم شد. در این شکل کرنش‌های محیطی و قائم برحسب کرنش نظیر مقاومت فشاری بتن محصور نشده (ϵ_{co}) به مقیاس در آمده‌اند.



شکل ۱۴. نتایج آزمایشگاهی کرنش پلاستیک برای مقادیر مختلف محصورشدگی و شکل مقطع [۱۴]

شکل مقایسه رابطه به دست آمده برای پارامتر شکست (رابطه ۵) را با نتایج برگرفته از مطالعه پارامتریک (شکل ۱۷) نشان می‌دهد.



شکل ۱۸. مقایسه رابطه (۵) با نتایج تحلیل اجزاء محدود

در رابطه (۵)، λ ضریبی است که اثر محصورشدگی ناکامل را لحاظ می‌کند. در برخی از موارد پوشش‌های FRP بصورت نوارهایی با فاصله از یکدیگر به دور ستون پیچیده می‌شوند. در این حالت محصورشدگی بتن ناکامل می‌باشد. برای منظور نمودن این اثر، ضریب λ که بصورت نسبت تنش محصورشده ناکامل به تنش محصورشده کامل تعریف می‌شود با یک مطالعه پارامتریک محاسبه گردید:

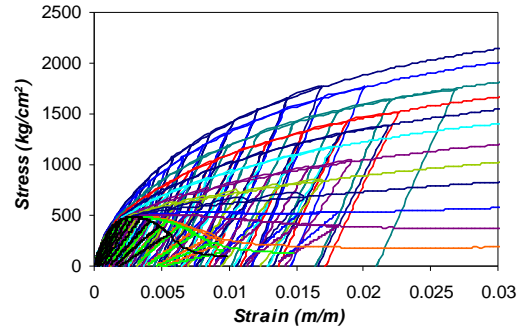
$$\lambda = e^{-f \times e_{\max} \times (1 - e^{-0.3 e_{\max}})}$$

$$f(s/D, wE_f t/r) = \frac{\left(0.1 \times \ln\left(w \frac{E_f t}{r}\right) - 0.74\right) \times \left(\frac{s}{D}\right)^{\left(0.19 \times \ln\left(w \frac{E_f t}{r}\right) - 1.06\right)} \quad (6)}{1 + \left(\frac{s}{D}\right)^{\left(0.19 \times \ln\left(w \frac{E_f t}{r}\right) - 1.06\right)}}$$

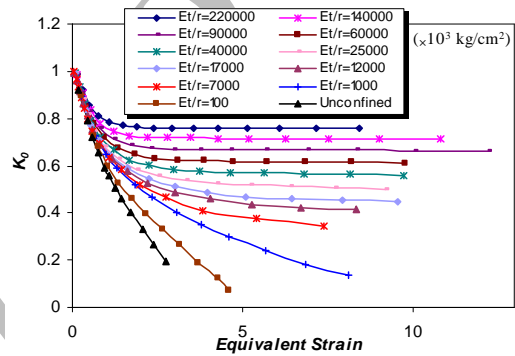
که e_{\max} کرنش قائم به مقیاس درآمده، w عرض نوار FRP بر حسب cm ، E سختی ورق FRP بر حسب kg/cm^2 ، t ضخامت FRP، r شعاع بتن محصور شده، s فاصله آزاد بین نوارهای FRP و D قطر بتن محصور شده است.

۴-۴. کرنش محیطی معادل

در توسعه مدل رفتاری بتن محصور شده با FRP تاکنون فرض بر این بود که ورق محصورکننده بتن گسیخته نشده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد رفتار بتن محصور شده با FRP بعد از گسیخته شدن ورق، مشابه حالت محصور نشده خواهد بود (شکل ۱۳). بنابراین لازم است محل گسیختگی FRP تعیین شود تا از آن به بعد، مدل رفتاری بتن محصور نشده جایگزین مدل رفتاری بتن محصور شده گردد.



شکل ۱۶. نمودار تنش-کرنش متوسط بتن برای سطوح مختلف محصورشدگی با FRP

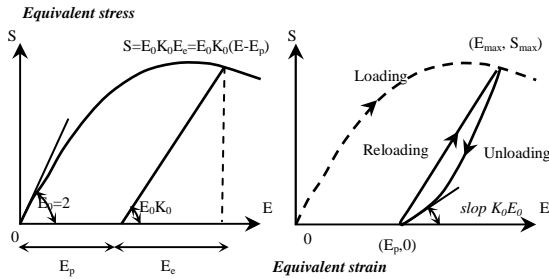


شکل ۱۷. تغییرات پارامتر شکست در بارگذاری تناوبی برای سطوح مختلف از سختی محصورشدگی ($E_f t/r$)

با توجه به نتایج به دست آمده در این مطالعه پارامتریک (شکل ۱۷) رابطه (۵) به‌عنوان رابطه پارامتر شکست برای بتن محصور شده با FRP ارائه می‌گردد:

$$\begin{cases} k_0 = k_{0_{uc}} + \lambda \times k_{0_{extra}} & , \quad k_{0_{uc}} = e^{-0.73 e_{\max} (1 - e^{-1.25 e_{\max}})} \\ k_{0_{extra}} = \frac{0.023 \left(\frac{E_f t}{r}\right)^{0.2909} \times (\ln(e_{\max} + 1)) \left(11 - 0.659 \ln\left(\frac{E_f t}{r} + 1\right)\right)}{1 + (\ln(e_{\max} + 1)) \left(11 - 0.659 \ln\left(\frac{E_f t}{r} + 1\right)\right)} \end{cases} \quad (5)$$

در (۵) $k_{0_{uc}}$ پارامتر شکست برای بتن محصور نشده است و $k_{0_{extra}}$ مقدار اضافی سختی در اثر محصورشدگی توسط FRP می‌باشد. $E_f t/r$ سختی محصورشدگی بر حسب kg/cm^2 می‌باشد بطوریکه E_f مدول ارتجاعی FRP، t ضخامت ورق FRP و r نیز شعاع بتن محصور شده است. e_{\max} بیشترین کرنش معادل قائم در آن سیکل بارگذاری است. در رابطه (۵)، تا قبل از گسیختگی FRP مقدار $k_{0_{extra}}$ مطابق فوق محاسبه می‌شود و پس از گسیختگی، $k_{0_{extra}}$ مساوی صفر قرار داده می‌شود که متناظر با مدل رفتاری بتن محصور نشده است (شکل -ب). زمان گسیختگی FRP از روی کرنش محیطی که رابطه آن بعداً ذکر می‌شود، تعیین می‌گردد.



شکل ۲۰. مدل رفتاری EPF و بارگذاری تناوبی

۱. حالت بارگذاری: $(E_{ed} \geq E_{e\max})$

$$S = K_0 E_0 E_e \tag{۸}$$

$$\begin{cases} k_0 = k_{0uc} + \lambda \times k_{0extra} & , \quad k_{0uc} = e^{-0.73e_{\max}(1-e^{-1.25e_{\max}})} \\ k_{0extra} = \frac{0.023 \left(\frac{E_f t}{r}\right)^{0.2909} \times (\ln(e_{\max} + 1))^{(11-0.659 \ln(\frac{E_f t}{r} + 1))}}{1 + (\ln(e_{\max} + 1))^{(11-0.659 \ln(\frac{E_f t}{r} + 1))}} \end{cases} \tag{۹}$$

$$E_p = \frac{17}{7} \{1 - \exp(-0.35 E_{\max})\} \tag{۱۰}$$

$$E_{\max} = E_{ed} + E_p \tag{۱۱}$$

۲. حالت بارگذاری مجدد: $(E_{ed} < E_{e\max} \text{ and } E_{ed} \geq E_{e0})$

$$S = S_0 + (S_{\max} - S_0) \frac{(E_{ed} - E_{e0})}{(E_{e\max} - E_{e0})} \tag{۱۲}$$

۳. حالت باربرداری: $(E_{ed} < E_{e\max} \text{ and } E_{ed} < E_{e0})$

$$S = K_0 E_0 E_{ed} \alpha \tag{۱۳}$$

$$\alpha = \text{slop} + \left(\frac{S_0}{K_0 E_0 E_{e0}} - \text{slop} \right) \left(\frac{E_{ed}}{E_{e0}} \right)^{PN} \tag{۱۴}$$

$$E_{\max} = E_{e\max} + E_p \quad \text{و} \quad \text{از رابطه (۹)} \tag{۱۵}$$

۴. بارگذاری کششی بعد از فشار: $(E_d < E_p)$

$$S = K_0 E_0 E_{ed} \tag{۱۶}$$

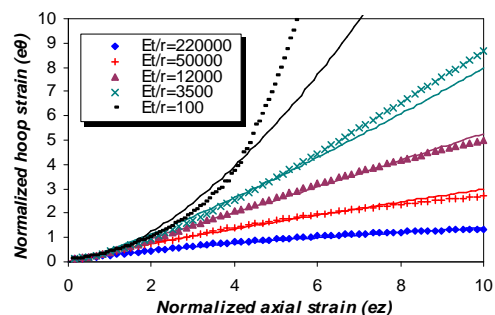
در این روابط K_0 پارامتر شکست، E_p کرنش پلاستیک، E_0 ثابت برابر با ۲/۰، S_0 تنش معادل اخیر، E_{e0} کرنش الاستیک اخیر، slop پارامتر باربرداری برابر با K_0^2 ، PN پارامتر باربرداری برابر با ۲/۰ و E_d کرنش معادل کلی می‌باشند. همانطور که در شکل آمده مسیر باربرداری از نقطه $(E_p, 0)$ با رابطه چند جمله‌ای آغاز می‌گردد که شکل تابع چند جمله‌ای به پارامترهای slop و PN وابسته است. مسیر بارگذاری مجدد به صورت خط مستقیم از نقطه‌ای که بارگذاری مجدد آغاز می‌گردد تا نقطه تنش-کرنش معادل ماکزیمم (E_{\max}, S_{\max}) ادامه دارد.

گسیختگی FRP زمانی رخ می‌دهد که کرنش آن به مقدار ϵ_{uf} (ماکزیمم کرنش FRP در آزمایش کشش) برسد. از طرفی با فرض از بین رفتن فاصله میان بتن و ورق محصورکننده، کرنش کششی ایجاد شده در FRP برابر با کرنش محیطی بتن محصور شده، است. بنابراین جهت تعیین محل گسیختگی FRP کافی است رابطه‌ای برای کرنش محیطی نمونه بتنی محصور شده با FRP برحسب کرنش قائم آن توسعه داده شود.

جهت تعیین رابطه کرنش محیطی (ϵ_θ) نمونه استوانه‌ای محصور شده با FRP (شکل ۶) با اعمال جابجایی قائم بارگذاری گردید و در هر گام افزایش کرنش محوری، با توجه به جابجایی‌های افقی گره‌های شماره ۱۹ و ۲۰ میزان کرنش محیطی محاسبه شد و این روند برای مقادیر مختلف از سختی محصورشدگی تکرار شد. با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعه پارامتریک، رابطه (۷) جهت تخمین کرنش معادل محیطی برای بتن محصور شده با FRP در نظر گرفته شد.

$$\begin{cases} e_\theta = (-0.01 \times a^2 + 0.1567 \times a - 0.1191) \times \\ e_z^{(-0.1283 \times a + 2.2546)} & , \quad a = \ln\left(\frac{E_f t}{r} + 1\right) \end{cases} \tag{۷}$$

در این رابطه e_θ و e_z به ترتیب کرنش محیطی و قائم نرمالیز شده با ϵ_{co} هستند و $E_f t/r$ سختی محصورشدگی برحسب kg/cm^2 . شکل ۱۹ مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعه پارامتریک را با رابطه (۷) نشان می‌دهد. در این شکل نقاط نتایج تحلیل المان محدود است و خطوط رابطه پیشنهادی می‌باشد.

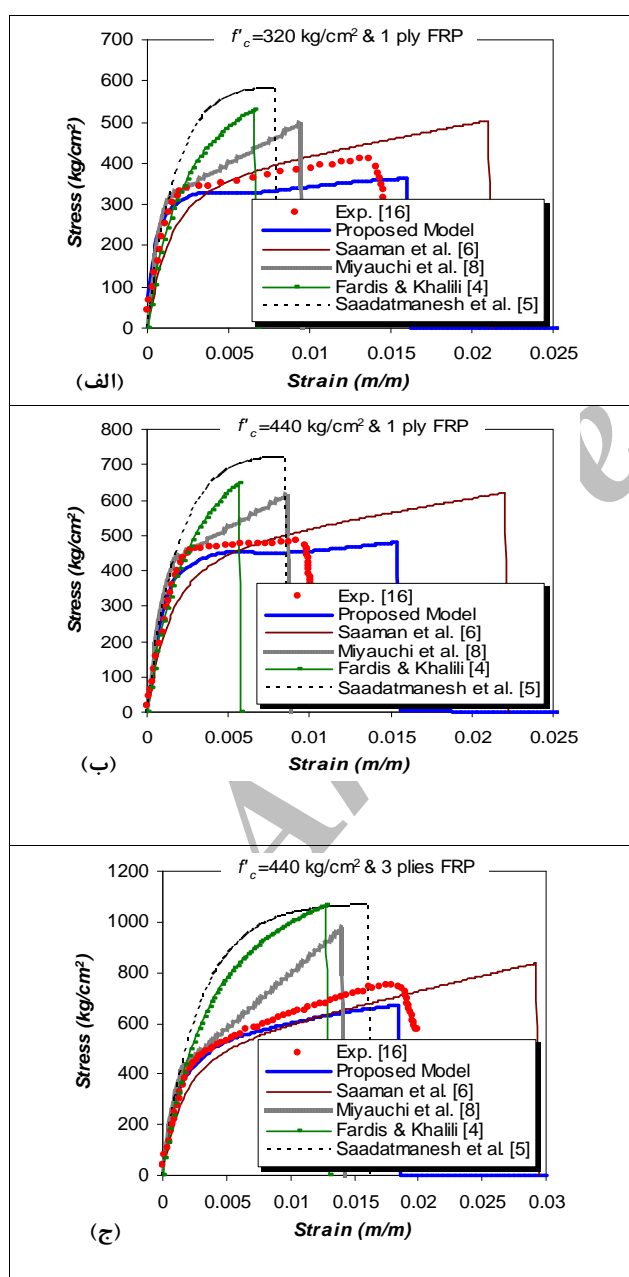


شکل ۱۹. مقایسه رابطه (۷) با نتایج تحلیل اجزاء محدود

۵. تنش-کرنش بتن محصور شده و منحنی های داخلی

تا این مرحله روابط توسعه داده شده برای اجزاء مدل رفتاری الاستو-پلاستیک و شکست (کرنش پلاستیک و پارامتر شکست) در بتن محصور شده با FRP ارائه گردید. با استفاده از روابط مدل رفتاری EPF **Error! Reference source not found.** در حالت تک‌محوره، تنش معادل (S) و نیز سختی (E^*) براساس شرایط بارگذاری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

محدود دارد و محل گسیختگی FRP نیز با توجه به رابطه کرنش محیطی (رابطه (۷)) به درستی پیش‌بینی می‌گردد. جهت بررسی رفتار غیرخطی اعضای تقویت شده با FRP، می‌توان از مدل‌سازی این اعضا به کمک المان Fiber در نرم‌افزار تحلیل غیرخطی COM3 استفاده نمود و برای نواحی فشاری در قسمت‌های محصور شده با FRP، مدل ارائه شده را به کار گرفت. جهت اعتبارسنجی مدل ستون‌های تقویت شده با FRP از آزمایش بی و همکاران [۲۲] استفاده شده است. نمونه‌های این آزمایش ستون‌هایی با مقطع مربع شکل و ابعاد $20 \times 20 \times 70$ cm می‌باشند (شکل ۲۴).

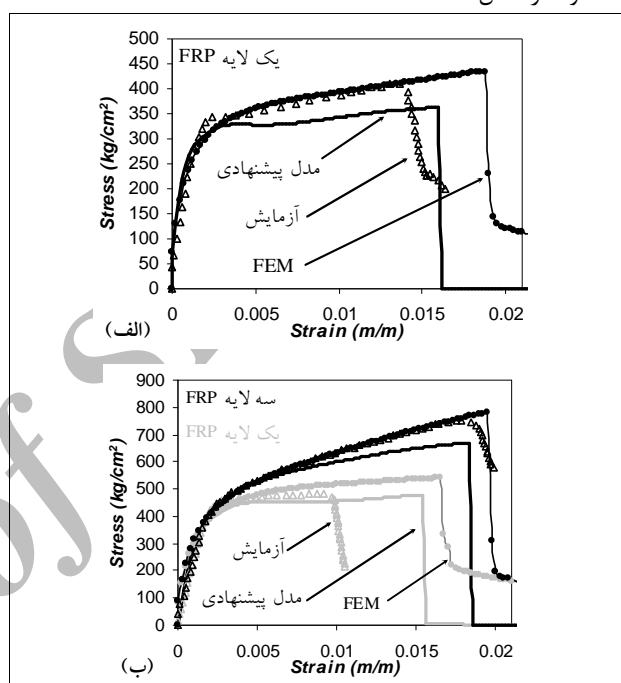


شکل ۲۲. مقایسه مدل ارائه شده و مدل‌های پیشین

۶. اعتبارسنجی مدل پیشنهادی برای بتن محصور شده

FRP با

جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از نتایج آزمایشگاهی دیمرز و نیل [۱۶] استفاده شده است. مشخصات مصالح و روش آزمایش در بخش ۳-۳ مقاله توضیح داده شده است. مقایسه مدل رفتاری پیشنهاد شده با نتایج آزمایش و همچنین نتایج آنالیز مدل المان محدود در شکل ۲۱ آمده است.



شکل ۲۱. مقایسه مدل ارائه شده، آزمایش [۱۶] و تحلیل اجزاء محدود

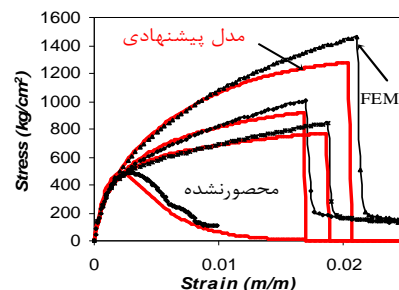
(الف) و $f'_c = 320 \text{ kg/cm}^2$ (ب) $f'_c = 440 \text{ kg/cm}^2$:

شکل ۲۲ مقایسه رابطه پیشنهادی با مدل‌هایی که در گذشته ارائه شده‌اند را برای آزمایش دیمرز و نیل [۱۶] نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است در این نمونه علاوه بر مدل پیشنهادی، تنها رابطه سامان و همکاران [۶] از دقت لازم برخوردار می‌باشد. البته این مدل نیز در تعیین تنش ماکزیمم و کرنش متناظر آن که در زمان گسیختگی FRP اتفاق می‌افتد به‌ویژه در مقادیر زیاد سختی محصورشدگی خطای قابل توجهی دارد.

در مقایسه دیگری، نمونه بتن محصور شده با FRP در سه سطح مختلف از سختی محصورشدگی مدل گشته و با کمک برنامه COM3 تحلیل غیر خطی تحت بارگذاری یکنوا به روی این مدل صورت گرفته است. شکل ۲۳ مقایسه نتایج تحلیل را با مدل رفتاری پیشنهاد شده نشان می‌دهد.

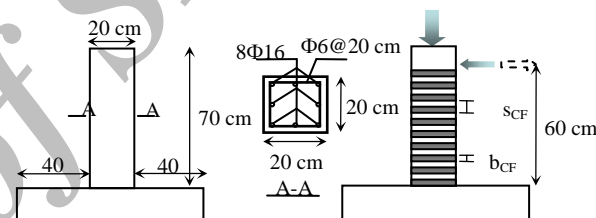
همانطور که در شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ مشخص است، مدل پیشنهادی انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی و تحلیل المان

همانطور که در شکل ۲۴ مشخص است، این ستون با استفاده از نوارهای FRP به عرض $3/5$ cm و فاصله مرکز به مرکز 6 cm تقویت شده است. البته FRP در نمونه CF30-4-48 به صورت کامل به دور ستون پیچیده شده است. مقاومت کششی و مدول ارتجاعی ورق های FRP به ترتیب 35×10^3 kg/cm² و $2/35 \times 10^6$ kg/cm² ضخامت آن $0/11$ cm می باشد. نیروی محوری ثابت در این ستون ها $0/48f_c b h$ (معادل با ۵۰ ton) است. مقایسه نتایج آزمایش و مدل تحلیلی در شکل های ۲۵ و ۲۶ آمده است.

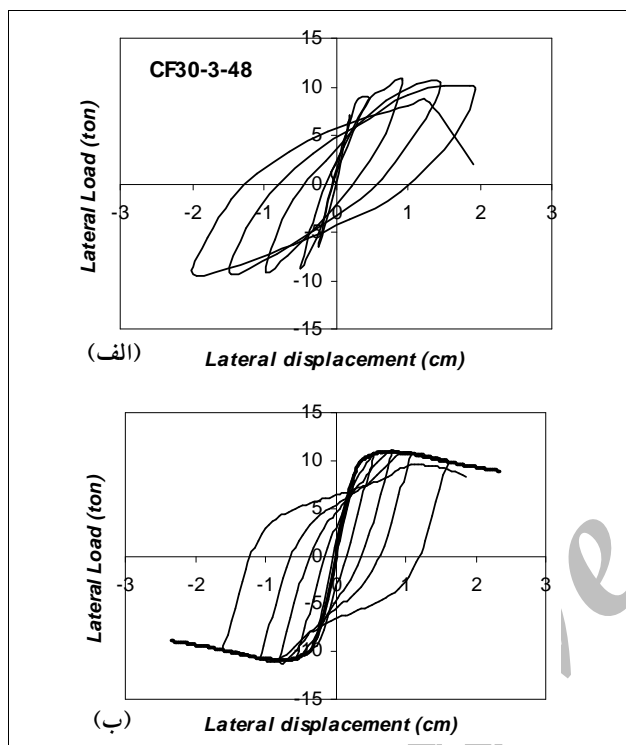


شکل ۲۳. مقایسه مدل رفتاری پیشنهادی با مدل المان محدود

بارگذاری نمونه ها شامل یک بار جانبی رفت و برگشتی و یک بار محوری ثابت بوده است. هر ستون با ۵ المان Fiber که شامل مشخصات محصورشدگی با خاموت و FRP بوده، مدل گشته است. مقاومت بتن استفاده شده و ضریب پواسون آن به ترتیب kg/cm^2 ۲۶۰ و ۰/۲۰ می باشند.



شکل ۲۴. مشخصات ستون های تقویت شده با FRP در آزمایش [۲۲]

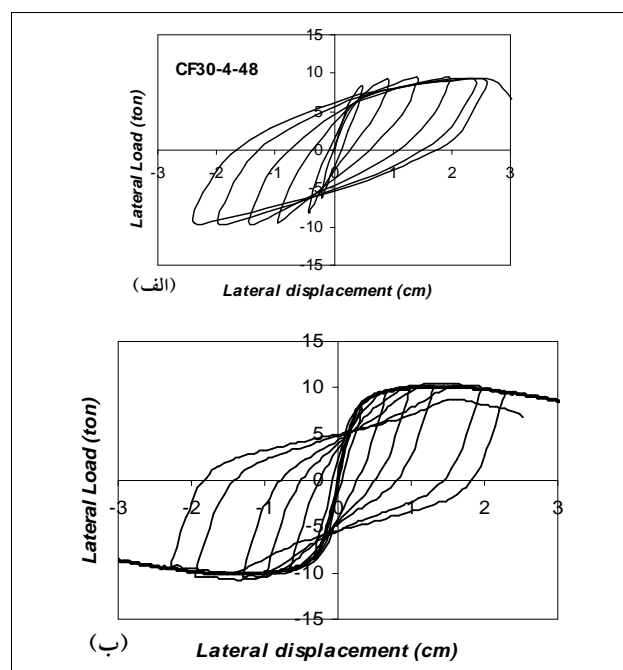


شکل ۲۶. نمودار نیرو- تغییر مکان جانبی برای نمونه CF30-3-48 در (الف) آزمایش [۲۲] (ب) مدل المان محدود

۷. نتیجه گیری

به منظور تحلیل المان محدود اعضای بتن مسلح محصور شده با FRP، یک مدل رفتاری بتن که اثر محصورشدگی با FRP را لحاظ نماید، مورد نیاز است. در این مقاله بر اساس یک مطالعه پارامتریک بر روی پاسخ بتن محصور شده با FRP، مدل رفتاری فشاری بتن ارائه شده است. این مدل می تواند در تحلیل غیرخطی اعضای بتن مسلح تقویت شده با FRP بکار گرفته شود.

در این تحقیق جهت مطالعه پارامتریک و گسترش مدل رفتاری بتن محصور شده با FRP از برنامه المان محدود غیر خطی COM3 استفاده شد. مدل سه بعدی بتن محصور شده با FRP ایجاد شده و با تغییر مشخصات FRP از جمله ضخامت، سختی و نیز فاصله ورق ها (در محصورشدگی ناکامل)، پاسخ مدل تحت بارگذاری رفت و



شکل ۲۵. نمودار نیرو- تغییر مکان جانبی برای نمونه CF30-4-48 در (الف) آزمایش [۲۲] (ب) مدل المان محدود

- [10] Maekawa K, Pimanmas A, Okamura H. "Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete", SPON Press; 2003.
- [11] Okamura, H., Maekawa, K., "Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete", Tokyo (Japan): Gihodo-Shuppan; 1991.
- [12] Maekawa K, Takemura J, Irawan P, Irie M. "Triaxial Elasto-Plastic and Continuum Fracture Model for Concrete", Concrete Library of JSCE, No. 22, 1993, pp. 131-161.
- [13] Chung, H.S., Yang, K.H., Lee, Y.H., Eun, H.C., "Stress-Strain Curve of Laterally Confined Concrete", Journal of Engineering Structures 24 (2002), pp. 1153-1163.
- [14] Pallewatta, T.M., Irawan, P., Maekawa, K., "Confinement Effectiveness of Lateral Reinforcement Arrangements in Core Concrete", Journal of materials, concrete structures and pavements, No. 520, V-28, 1995.
- [15] Giakoumelis, G., Lam, D., "Axial Capacity of Circular Concrete-Filled Tube Columns", Journal of Constructional Steel Research, v. 60, No. 7, pp. 1049-68, 2004.
- [16] Demers, M., Neale, K.W. "Strengthening of Concrete Columns With Unidirectional Composite Sheets", Canadian Society for Civil Engineering; 1994. pp. 895-905.
- [17] Lorenzis, L., "A Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with FRP Composite", 2001, Chalmers University.
- [18] Matthys, S., Taerwe, L., Audenaert, K., "Tests on Axially Loaded Concrete Columns Confined by Fiber Reinforced Polymer Sheet Wrapping", 4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, 1999, pp. 217-228.
- [19] Berthet, J.F., Ferrier, E., Hamelin, P., "Compressive Behavior of Concrete Externally Confined by Composite Jackets. Part A: Experimental Study", Construction and Building Materials 19(2005)223-232.
- [20] Xiao, Y., Wu, H., "Compressive Behavior of Concrete Confined by Various Types of FRP Composite Jackets", Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 22, No. 13, 2003.
- [21] Karabinis, A.I., Rousakis, T.C., "Concrete Confined by FRP Material: a plasticity approach", Journal of Engineering Structures 24 (2002), pp. 923-932.
- [22] Ye, L.P., Zhang, K., Zhao, S.H., Feng, P., "Experimental Study on Seismic Strengthening of RC Columns With Wrapped CFRP Sheets", Construction and Building Materials 17 (2003) 499-506.

[۲۳] قربی، احسان، اصلاح مدل‌های رفتاری برای بهبود عملکرد لرزه‌ای اعضای بتن مسلح تقویت شده با FRP، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵

برگشتی به دست آمد. تغییرات کرنش پلاستیک و سختی، در اثر شکست بتن اندازه‌گیری شد و در مدل دو بعدی الاستوپلاستیک و شکست ارائه شده توسط اوکامورا و ماییکاوا [۱۱] بکار گرفته شد. مطالعه پارامتریک نشان داد کرنش پلاستیک وابسته به میزان محصورشدگی بتن نمی‌باشد، اما تغییرات پارامتر شکست در طول بارگذاری تناوبی و همچنین کرنش معادل محیطی نمونه محصور شده وابسته به میزان سختی محصورشدگی E_{ft}/t است. مقایسه مدل رفتاری پیشنهاد شده با نتایج آزمایشگاهی و نتایج آنالیز سه بعدی المان محدود نشان دهنده دقت خوب مدل توسعه یافته می‌باشد.

مراجع

- [1] Richart, F.E., Brandtzaeg, A., Brown, R.L., "A study of The Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses", University of Illinois, Urbana. Engineering Experiment Station Bulletin, No. 185.
- [2] Newman, K., Newman, J.B., "Failure Theories And Design Criteria For Plain Concrete", Proceedings, International Engineering Materials Conference on Structure, Solid Mechanics and Engineering Design, Southampton 1969, Wiley Interscience, New York, Part 2, pp. 963-995.
- [3] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- [4] Fardis, M.N., Khalili, H., "Concrete Encased In Fiberglass-Reinforced-Plastic", Journal of the American Concrete Institute, Proceedings, 1981, 78(6), pp. 440-446.
- [5] Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R., Li, M.W., "Strength And Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced With Fiber Composite Straps", 1994, ACI Struct. J., 91(4): 434-447.
- [6] Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy, M., "Model of Concrete Confined by Fiber Composites", 1998, Journal of Structural Engineering, ASCE, 124(9): 1025-1031.
- [7] Spoelstra, M.R., Monti, G., "FRP-Confined Concrete Model", Journal of Composites for Construction, ASCE, v. 3, No. 3, August 1999, pp. 143-150.
- [8] Miyauchi, K., Nishibayashi, S., Inoue, S., "Estimation of Strengthening Effects With Carbon Fiber Sheet for Concrete Column", Proceedings of the Third International Symposium (FRPRCS-3) on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Sapporo, Japan, 14-16 Oct. 1997, Vol 1, pp. 217-224.
- [9] Kono, S., Inazumi, M., Kaku, T., "Evaluation of Confining Effects of CFRP Sheets on Reinforced Concrete Members", Proceedings of the 2nd Conference on Composites in Infrastructure ICCI 98, 5-7 Jan., 1998, Tucson, Arizona, pp. 343-355.