



مدل سازی رفتار عضو تیر - ستون بتن آرمه تقویت شده با FRP

حسن حاجی کاظمی^۱، محمدامین ایمان نژاد^۲

۱- استاد دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- کارشناس ارشد سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد

m.imannejad@gmail.com

خلاصه

یکی از کاربردهای مهم FRP در تقویت سازه های بتن آرمه ایجاد فشار محصورکننده در اطراف عضو و افزایش مقاومت و شکل پذیری آن است. استفاده از این مواد به دلیل خصوصیتی چون مقاومت در برابر خوردگی، وزن کم (نسبت مقاومت به وزن بالا در مقایسه با مصالح سنتی) و مقاومت کششی بالا، روز به روز بیشتر می شود. جهت استفاده بهینه از FRP و افزایش بیشتر شکل پذیری، مقاومت فشاری و خمشی ستون، در این پژوهش با تغییر زاویه پیچش FRP افزایش قابل ملاحظه ای در بهبود رفتار ستون نسبت به ستون غیر محصور ملاحظه گردید. ستون ها در نرم افزار ANSYS مدل گردیده اند، و جهت کالیبره کردن نرم افزار نتایج یک ستون محصور شده به وسیله FRP در نرم افزار مدل و مقایسه گردید و صحت آن مورد تایید قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: بتن، خمش، محصورشدگی، شکل پذیری، FRP.

۱. مقدمه

ستونهای بتن آرمه به عنوان اعضای سازه ای که بار محوری را با و یا بدون وجود لنگر خمشی منتقل میکنند، از اهمیت ویژه ای در عملکرد و ایمنی سازه برخوردارند. امروزه به دلایل گوناگونی هم چون تجدید نظر در ضوابط آیین نامه های طراحی، تغییر کاربری سازه و تغییر در تقاضای ظرفیت بار به دلیل خطای طراحی یا ساخت، نیاز به تقویت اعضای سازه احساس میشود.

قرارگیری بتن تحت تنشهای فشاری چند محوره باعث افزایش مقاومت و شکل پذیری بتن می گردد که این افزایش مقاومت و شکل پذیری به دلیل جلوگیری از گسترش ترکهای عرضی در بتن است. تنش های چند محوره بوسیله محصور کردن بتن توسط فولادهای عرضی، ورقهای فولادی و یا کامپوزیت ها صورت می گیرد. تقویت ستونهای بتن آرمه در ابتدا با قرار دادن ژاکت فولادی در اطراف ستون انجام می گرفت که در دهه های اخیر جای خود را به پوششهایی از جنس پلیمر مسلح به الیاف FRP داده است. استفاده از FRP در تقویت ستون نه تنها به دلیل سهولت نصب، زیبایی و انعطاف پذیری، بلکه به دلیل نسبت مقاومت به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی بسیار مورد توجه واقع شده. طراحی ایمن و اقتصادی فقط در صورت درک صحیح و مدل سازی دقیق بتن محصور در FRP امکان دارد.

برای شناخت رفتار بتن تحت تنشهای چند محوره آزمایشات زیادی انجام شده است. نخستین آزمایش در سال ۱۹۲۸ توسط Richart انجام گرفت [1]، در آزمایشات این محققین فشارهای جانبی یکنواخت با مقادیر مختلف توسط سیال و بصورت فعال به بتن وارد می شد. نتایج آزمایش نشان داد که مقاومت فشاری بتن محصور شده به محصور نشده رابطه ای خطی با نسبت فشار جانبی به مقاومت بتن محصور شده دارد.

در سال ۱۹۹۷، Saadatmanesh و همکاران [2,3] آزمایشاتی روی ستونهای با مقاطع دایروی و مستطیلی بتنی انجام دادند. در طی آزمایش ظرفیت باربری ستون دایروی بدون ژاکت در شکل پذیری تغییر مکانی در حدود ۱/۵ برابری افزایش یافت نمود. ستون تقویت شده با ژاکت نیز تا شکل پذیری تغییر مکانی برابر با ۶ بدون هیچگونه علائمی از شکست مقاومت کرده و بار جانبی به میزان ۴۰٪ بزرگتر از حالت بدون ژاکت را تحمل نمود. در مرحله بعد، پس از بارگذاری ستون بدون ژاکت تا شکست کامل، از روش تعمیر استفاده شد و بتن سست اطراف ناحیه شکست برداشته و بتن جدید در آن

ناحیه قرار گرفت، بطوریکه سطح مقطع اولیه هیچگونه تغییر نکرد. ستون تعمیر شده توسط ژاکتهای پلیمری تقویت گردید و برای هر دو ستون دایروی و مستطیلی عملکرد ستون بهتر از حالت قبل از تقویت مشاهده شد.

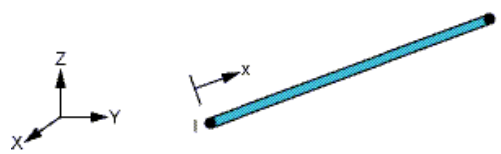
در سال ۱۹۹۹، Mufti, Purba [4] سه نمونه ستون با مقاطع دایروی ساخته و دو نمونه از آن ها را توسط ورقهای پلیمری از جنس کربن دورپیچ تقویت کردند. پس از بارگذاری نمونه ها تحت بار محوری، ملاحظه گردید که ظرفیت باربری ستون ها ۹۰٪ افزایش یافته است.

Puldio و همکاران [5] در سال ۲۰۰۱ دو قاب را که به وسیله آیین نامه های قبل از ۱۹۷۰ طراحی شده بودند را تحت آزمایش قرار دادند. پس از تقویت تیر و ستون ها با استفاده از الیاف کربن تک سویه، شکل پذیری تغییر مکانی آنها از ۲ به ۷ افزایش یافت.

در سال ۲۰۰۲ Tan [6] با آزمایش ستون های مستطیلی تحت بار محوری رابطه ای جهت ظرفیت باربری محوری ارائه نمود. در این نمونه ها الیاف کربن و شیشه که در جهت طولی و عرضی نمونه را تقویت می کردند استفاده شده بود. در نمونه هایی که ستون ها توسط الیاف عرضی محصور شده بودند ظرفیت باربری بیشتری مشاهده شد.

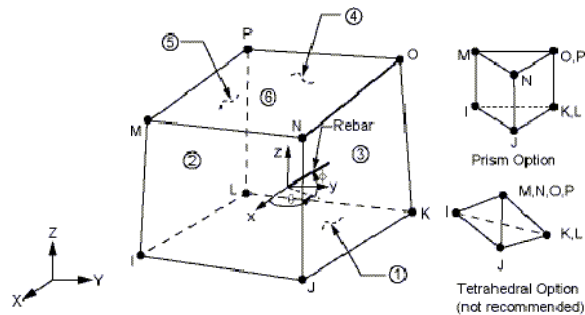
۲. مدل سازی

جهت مدل سازی میلگردها از المان LINK 8 در نرم افزار ANSYS استفاده می شود. این المان می تواند برای مدل سازی خرپاها، کابل ها، رابط ها و فنرها به کار رود. المان سه بعدی LINK 8 یک المان فشاری-کششی تک محوره با ۳ درجه آزادی در هر نود می باشد. همچنین این المان توانایی تحمل خمش را ندارد ولی برخی ویژگی ها همچون خزش، پلاستیسیت، تنش سختی و ... در آن لحاظ شده است. در شکل ۱ هندسه المان LINK 8 نشان داده شده است [7].



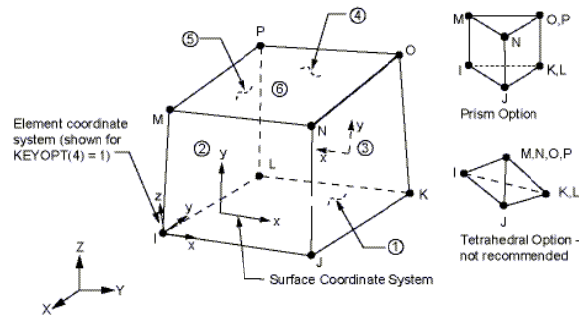
شکل ۱- المان LINK 8

برای مدل سازی بتن یا بدون آرماتور از المان SOLID 65 استفاده می شود. این المان دارای ۸ گره بوده و هر گره دارای ۳ درجه آزادی شامل انتقال در جهت محوره های X، Y، Z می باشد. همچنین برای این المان می توان تا ۳ نوع متفاوت از آرماتور را در جهت های مختلف تعریف نمود. میلگردها را میتوان به صورت پخش شده در سه جهت مختلف در المان در نظر گرفت. ولی جهت بالابردن دقت حل تمام میلگردها شامل میلگردهای طولی و عرضی، توسط المان LINK 8 در محل واقعی خود مدل شده اند. در شکل ۲ هندسه المان نشان داده شده است [7].



شکل ۲- المان SOLID 65

برای مدل کردن کامپوزیت FRP المان لایه ای SOLID46 به کار گرفته شده. در این المان می توان مواد کامپوزیت را حداکثر تا ۱۰۰ لایه تعریف کرد و هر لایه می تواند از نظر جنس، ضخامت و زاویه قرارگیری الیاف با لایه دیگر متفاوت باشد. هندسه، موقعیت قرارگیری گره ها و سیستم مختصات محلی این المان در شکل ۳ نشان داده شده است [7].



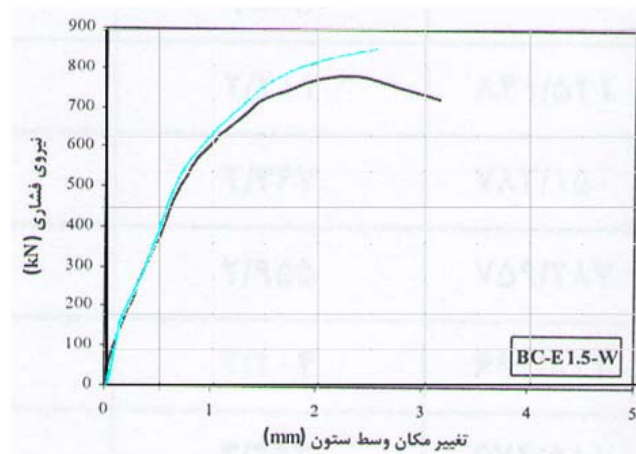
شکل ۳- موقعیت قرار گیری گره ها و دستگاه مختصات محلی المان SOLID 46

۳. بررسی صحت مدل سازی

برای بررسی صحت مدل سازی از آزمایشات انجام شده بر روی بتن محصور در FRP که شامل بتن با سه مقاومت فشاری ۲۰/۱ و ۲۱/۸ و ۲۳/۲ مگا پاسکال و خروج از مرکزیت های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ میلیمتر و محصور در ۱ لایه FRP بود استفاده گردید [۸]. در این تحقیق از آزمایشات نمونه ی مکعبی با ابعاد ۲۰×۲۰ و با خروج از مرکزیت ۱۵ میلیمتر و مقاومت فشاری بتن ۲۰/۱ MPa انتخاب و مدل شد. مهم ترین خصوصیات مکانیکی FRP در آزمایشات عبارتند از:

- ضخامت لایه ۰/۱۷۵ میلیمتر
- ضریب کشسانی ۲۳۴ GPa
- مقاومت کششی ۲۸۷۶ MPa
- کرنش نهایی ۱/۲۳ درصد

در شکل ۴ مقایسه نتایج مدل سازی با ANSYS و نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است.



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل سازی با ANSYS و آزمایش [۸]

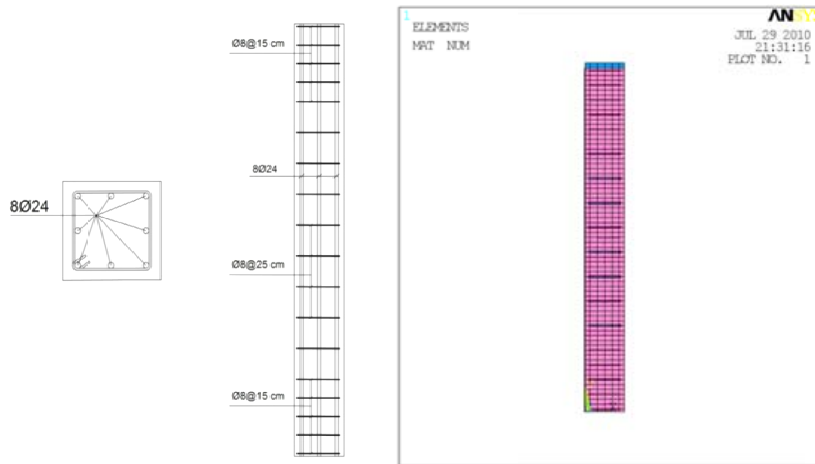
ملاحظه می شود که نرم افزار به خصوص در حصول مقاومت نهایی ستون به خوبی عمل نموده و تطبیق قابل قبولی بین آزمایش و نرم افزار

وجود دارد.

۴. مشخصات و ابعاد نمونه های مدل شده

نمونه های مدل شده در این تحقیق، ستون بتن آرمه با مقطع مربعی هستند. علت انتخاب مقطعی چهارگوشه برای نمونه ها آن است که در مطالعات گذشته کمتر از این نوع مقاطع استفاده شده است. در حالی که بسیاری از ستون های نیازمند ترمیم دارای مقطعی چهارگوشه هستند. شکل ۵ جزئیات و ابعاد نمونه ستون های مدل شده را نشان می دهد.

نمونه های مدل شده شامل ۸ ستون بتن آرمه است که شامل ۱ نمونه مرجع بدون تقویت و ۷ نمونه با دورپیچ CFRP می باشند. ستون ها دارای مقطع مربعی به ابعاد ۴۰۰×۴۰۰ میلیمتر و طول آزاد نمونه ستونها برابر با ۳۵۰۰ میلیمتر می باشد.



شکل ۵- جزئیات نمونه های ستونهای مدل شده

میلگردهای فولادی مورد استفاده دارای تنش تسلیم $f_y = 3700 \text{ kg/cm}^2$ و مدول الاستیسیته $E_s = 2100000 \text{ kg/cm}^2$ می باشد. بتن مورد استفاده دارای مقاومت ۲۸ روزه $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ و مدول الاستیسیته $E_c = 240000 \text{ kg/cm}^2$ می باشد، اتصال ستون به پی گیردار فرض شده است. کلیه نمونه ها با دو لایه CFRP با مشخصات زیر دور پیچ نموده شده اند [9]:

$$E_{11} = 151 \text{ GPa}, E_{33} = E_{22} = 10.1 \text{ GPa}$$

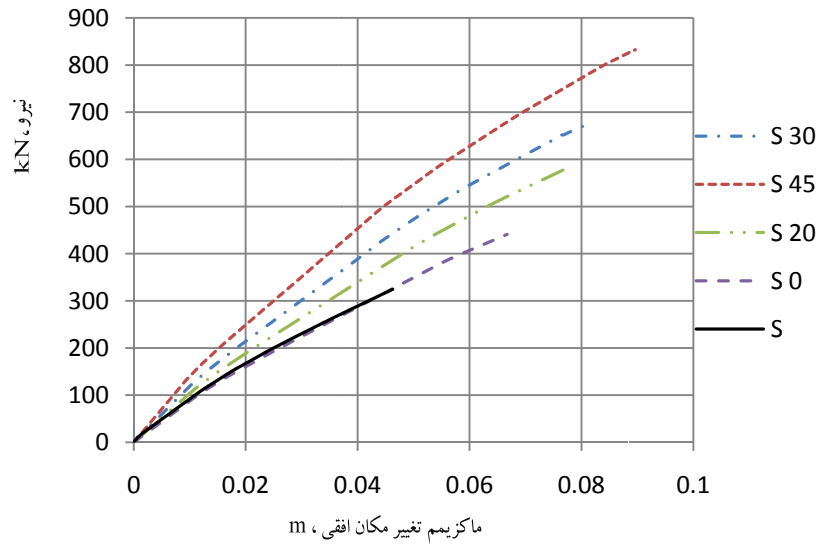
$$G_{23} = 5.7 \text{ GPa}, G_{12} = G_{13} = 3.4 \text{ GPa}, \nu_{12} = 0.24$$

بارگذاری ستون ها به صورت افزایشی و با خروج از مرکزیت ۲۰ سانتیمتر از محور مرکزی ستون، بر روی نمونه ها اعمال شده است.

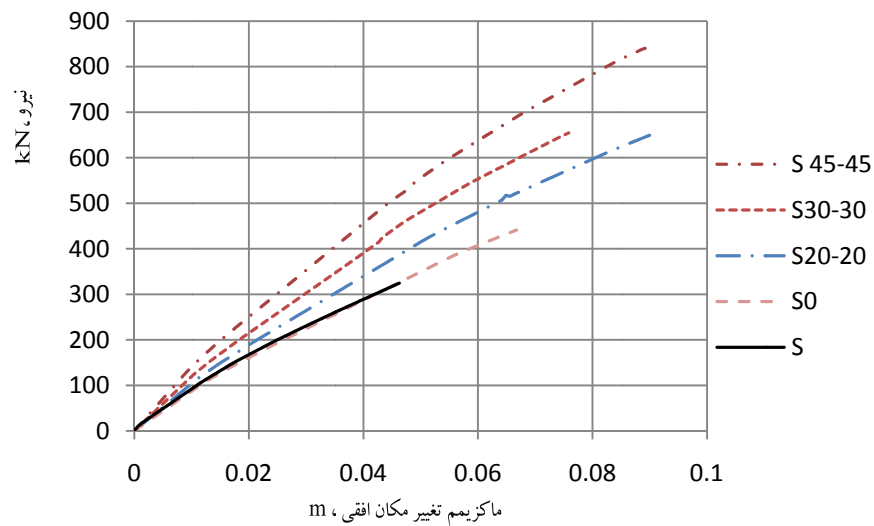
۵. بررسی نتایج

نامگذاری نمونه ها به صورت S_i و S_{ij} می باشد که S معرف مربع بودن مقطع و i و j معرف زاویه قرارگیری الیاف FRP نسبت به افق می باشد. به عنوان مثال S_{30} معرف ستونی با مقطع مربع و با دورپیچ FRP شامل دو لایه الیاف یک جهته و زاویه 30° با افق است و S_{30-30} معرف ستونی با مقطع مربع و با دورپیچ FRP شامل دو لایه متقاطع الیاف یک جهته و زاویه 30° با افق است.

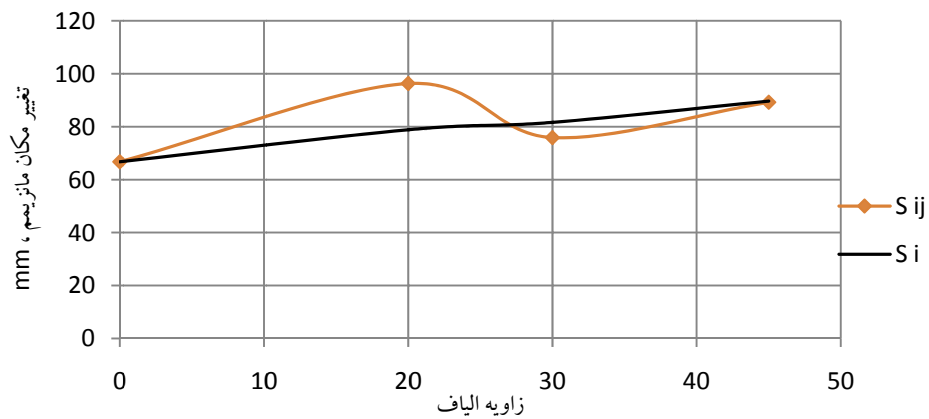
از مطالعات پارامتری انجام شده نتایج زیر را میتوان استخراج نمود:



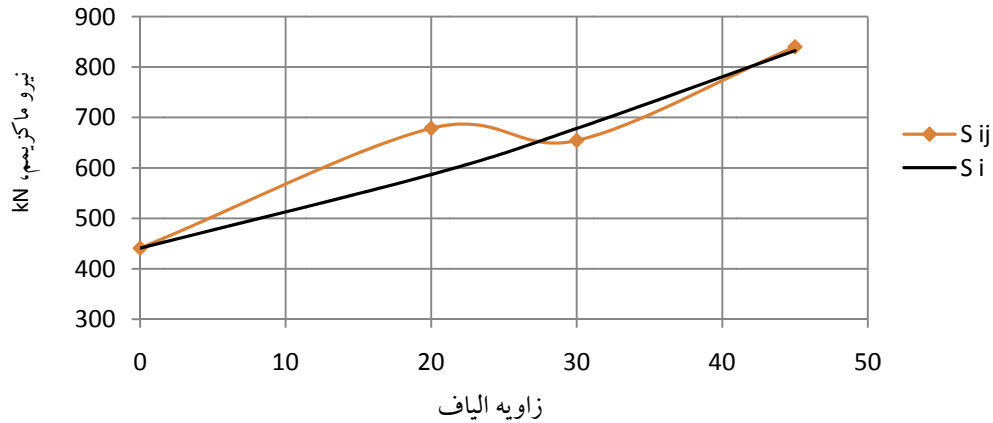
شکل ۶- نمودار تجمعی نیرو- ماکزیمم تغییر مکان افقی



شکل ۷- نمودار تجمعی نیرو- ماکزیمم تغییر مکان افقی



شکل ۸- زاویه قرارگیری FRP - تغییر مکان ماکزیمم



شکل ۹- زاویه قرارگیری FRP- نیروی محوری ماکزیمم

با بررسی این نمودارها مشاهده می شود در صورتیکه محدودیت تغییر مکان جانبی وجود نداشته باشد ظرفیت ستون مرکب سیر صعودی خواهد داشت.

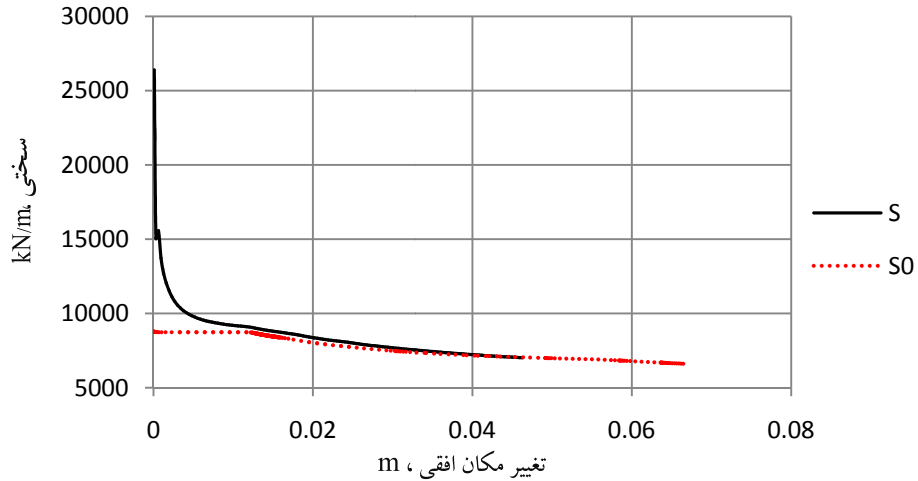
جدول ۱- نسبت افزایش ظرفیت باربری و تغییر مکان

نام نمونه	S	S0	S20	S30	S45
Load (N)	۳۲۴۶۰۶	۴۴۱۰۳۲	۵۸۷۰۲۴	۶۷۸۱۹۳	۸۳۲۵۵۲
نسبت افزایش ظرفیت باربری نسبت به S	۱	۱/۳۶	۱/۸۱	۲/۰۸۹	۲/۵۶۵
تغییر مکان (mm)	۴۶/۳	۶۶/۷	۷۸/۸۵	۸۱/۶۳	۸۹/۶۲۷
نسبت افزایش تغییر مکان نسبت به S	۱	۱/۴۴	۱/۷۰۳	۱/۷۶۳	۱/۹۳۶

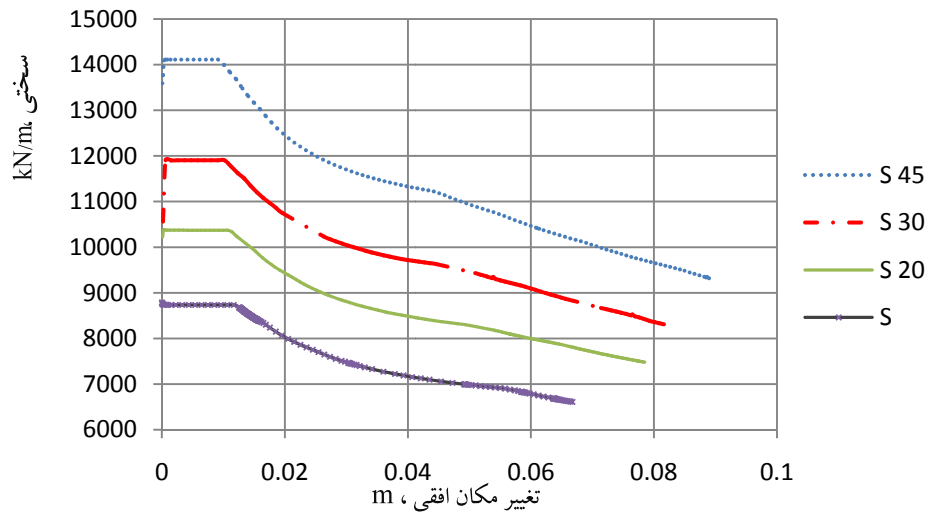
جدول ۲- نسبت افزایش ظرفیت باربری و تغییر مکان

نام نمونه	S	S 20-20	S 30-30	S 45-45
Load (N)	۳۲۴۶۰۶	۶۷۸۶۵۸	۶۵۴۵۰۸	۸۴۰۰۸۷
نسبت افزایش ظرفیت باربری نسبت به S	۱	۲/۰۹	۲/۰۱۶	۲/۵۹
تغییر مکان (mm)	۴۶/۳	۹۶/۳	۷۵/۸۶۷	۸۹/۲
نسبت افزایش تغییر مکان نسبت به S	۱	۲/۰۸	۱/۶۴	۱/۹۲۶

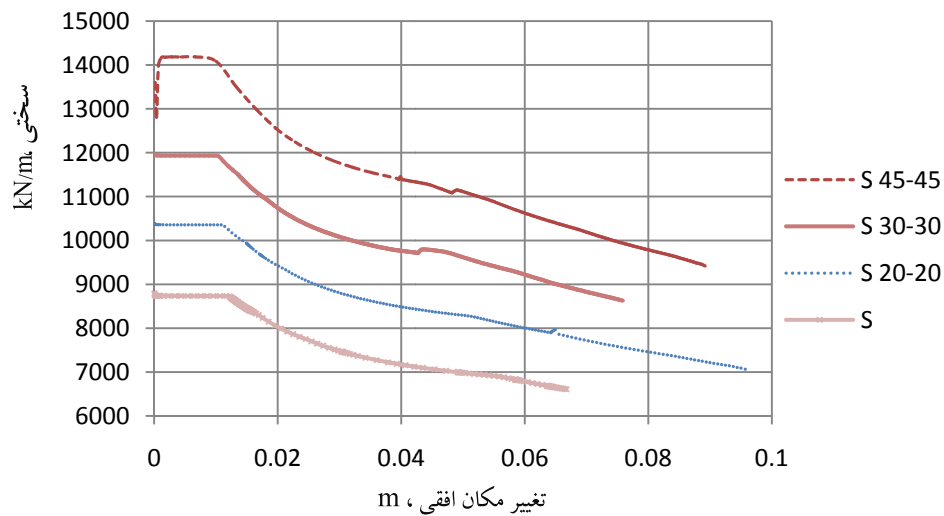
در این پژوهش نسبت بار محوری به تغییر مکان افقی برای درک رفتار ستون محصور شده سختی نامیده ایم. نمودارهای سختی فوق نسبت به تغییر مکان بیانگر تغییر رفتار غیرخطی ستون در مرحله ای از بارگذاری تا حد انهدام است.



شکل ۱۰- نمودار تجمعی سختی - تغییر مکان ماکزیمم افقی



شکل ۱۱- نمودار تجمعی سختی - تغییر مکان ماکزیمم افقی



شکل ۱۲- نمودار تجمعی سختی - تغییر مکان ماکزیمم افقی



۶. نتیجه گیری

با بررسی نمودارها و جداول فوق نتایج زیر حاصل می گردد :

- دقت مدل استفاده شده قابل قبول است و میتواند در مدل سازی رفتار بتن محصور شده به کار رود.
- با کاهش زاویه FRP نسبت به محور طولی ستون ظرفیت محوری و خمشی ستون محصور شده نسبت به ستون محصور نشده به میزان قابل توجه ای افزایش می یابد .
- با کاهش زاویه FRP نسبت به محور طولی ستون شکل پذیری ستونهای محصور شده نسبت به ستون محصور نشده افزایش می یابد .
- سختی ستون های محصور شده با افزایش زاویه FRP افزایش می یابد .

۷. مراجع

1. Lorenzis, L.(2001) ,“A comparative study of models on confinement of concrete cylinders with FRP composite”, Chalmers University of Technology.
2. Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R., and Jin, L.(1997) ,”Seismic strengthening of circular bridge piers with fiber composites” . ACI Structural Journal, Vol. 93, N. 6,PP639-647.
3. Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R., and Jin, L.(1997) ,”Repair of earthquake damaged RC columns with FRP wrap “. ACI Structural Journal, Vol. 94, N. 2.
4. Purba, B.K. and Mufti, A.A.(1999) ,“Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) jackets” , Canadian Journal of Civil Engineering, 26,PP 590-596.
5. Pulido, C. ,Saiidi,S. Sanders,D. , Itani,A.(2000) ,“Experimental validation and analysis of a CFRP retrofit of two-column bent”.
- 6.Tan, Kiang Hawee .(2002) ,“Strength enhancement of rectangular reinforced concrete columns using fiber-reinforced polymer“, Journal of Composites for Construction , ASCE,Vol.6 , No.3, pp. 175-183.
7. Release 10.0Documentation for ANSYS, ANSYS Inc., United States, 2005.
۸. حمید رضا صالحیان (۱۳۸۳)، "بررسی رفتار ستون های بتن آرمه تقویت شده با دورپی CFRP تحت اثر نیروی برون محور" پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشگاه فردوسی مشهد .
9. Starbuck, J. M., Luttrell, C. R. and Aramayo, G. (2005), “Metals and Ceramics Division, Cooperative Research and Development Agreement Final Report for Cooperative Research and Development Agreement,” January ,NO: ORNL00-0601 .