

Modeling Reinforced Concrete Beam with Reinforced Internal Failure by FRP and Comparing It with Laboratory Sample

Mohammad Abbasi Rasht Abadi¹, Hosein Naderpour^{2*}

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2 -Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Diagnosing type and amount of deficits in beams and structure is highly important in terms of performance and impact. Despite of paramount studies on CFRP application, its usage as Strips can be mentioned as one of the most important ways. Using Half Scale in building structure and lab beams would provide more adducible results. Considering type of breakdown and its progress, the growth cracks on the surface of beams is different. In all constructions, the manner of implementation and the quality of materials are two important principles in terms of performance and efficiency of the structure. In present study, type breakdown in the beam of reinforce concrete is addressed in a nondestructive manner. In this technique, by using finite element method in identifying beam breakdown without creating an unstable condition, one can achieve a nondestructive situation in experiments which is significantly cost – effective. Hence, 16 250mm × 250mm × 2100mm concrete beams were built and divided into two groups with and without FRP composite. Each group has a control beam and remained samples have breakdown in concrete and rebar. Prepared beams were put in a 4 – point experiment and, upon gathering and analyzing relevant data, beams prototyping was begun. By using finite element method, all beams were prototyped in lab. The findings from prototyping and lab analyses are compared in the format of load – location change graph. One can consider the results of prototyping as a proper approximation of lab samples.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 October 2020

Revise Date: 25 April 2021

Accept Date: 07 May 2021

Keywords:

Reinforced concrete beam

Ansys modeling

CFRP

Reinforcement

Failure detection

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.253713.2269>

*Corresponding author: Hosein Naderpour

Email address: naderpour@semnan.ac.ir

مدل سازی تیرهای بتن آرمه دارای خرابی داخلی تقویت شده با FRP و مقایسه با نمونه آزمایشگاهی

محمد عباسی رشت آبادی^۱، حسین نادرپور^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

تشخیص نوع و میزان خرابی در تیرها و سازه از جهت عملکرد و میزان تاثیر گذاری از اهمیت بالایی برخوردار است. با وجود تحقیقات بسیار در مورد کاربرد CFRP، استفاده از آن به صورت Strips را می توان به عنوان یکی از روش های مهم عنوان کرد. استفاده از مقیاس half scale در ساخت سازه و تیرهای آزمایشگاهی، نتایج قابل استنادتری را در اختیار قرار می دهد. با توجه به نوع خرابی و میزان پیشرفت ترک های بوجود آمده بر روی سطح تیر و همچنین رشد ترک ها متفاوت می باشد. در تمامی ساخت و سازه های صورت گرفته، نحوه اجرا و کیفیت مصالح بکار رفته ۲ اصل بسیار مهم در نوع عملکرد و میزان بازدهی سازه می باشد. در این تحقیق به شناسایی نوع خرابی های موجود در تیر بتن آرمه به روش غیر مخرب پرداخته شده است. در این روش استفاده از اجزای محدود در شناسایی نوع خرابی تیر، بدون رسیدن تیر به وضعیت ناپایدار را می توان در رده آزمایشات غیر مخرب قرار داد. که از نظر اقتصادی بسیار قابل اهمیت می باشد. از این رو ۱۶ تیر بتنی با ابعاد ۲۵۰ × ۲۵۰ × ۲۱۰۰ میلی متر ساخته شده و به دو دسته دارای کامپوزیت FRP و بدون آن تقسیم شده است. هر گروه دارای یک تیر کنترل بوده و باقی نمونه ها دارای خرابی ایجاد شده در بتن و میلگرد می باشند. تیرهای تهیه شده تحت آزمایش ۴ نقطه ای قرار گرفته و پس از جمع آوری نتایج و بررسی و تحلیل داده ها، مدل سازی تیرها آغاز گردیده است. با استفاده از روش اجزای محدود به مدل سازی تمامی تیرهای ساخته شده در آزمایشگاه پرداخته شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل مدل سازی و آزمایشگاهی در قالب نمودار بار-تغییر مکان با یکدیگر مقایسه شده است. می توان نتایج مدل سازی را تقریب مناسبی از نمونه های آزمایشگاهی دانست.

کلمات کلیدی: تیر بتن آرمه، مدل سازی، Ansys، مقاوم سازی، CFRP، تشخیص نوع خرابی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.253713.2269	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.253713.2269	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۲/۱۷	۱۴۰۰/۰۲/۱۷	۱۴۰۰/۰۲/۰۵	۱۳۹۹/۰۸/۰۳
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				حسین نادرپور		
				naderpour@semnan.ac.ir		

۱- مقدمه

برای تقویت برشی تیرهای بتنی توسط الیاف پلیمری CFRP مدل FE معرفی شده است [1] از مشخص‌های اصلی مدل عددی بیان شده، این که المانهای خطی را به صورت غیر خطی انتقال داده و رفتار بین دورپیچ‌های پلیمری با سطح بتن را شبیه‌سازی می‌نماید. تیرها توسط نرم افزارهای المان محدود مورد تحلیل قرار گرفته و همچنین با دقت بسیار بالایی محل‌های گسیختگی و نیز چگونگی رفتار سازه را تعیین می‌نماید. تحلیل محل و نوع خرابی قبل از ایجاد خسارت سازه ای میتواند کمک بزرگی چه از لحاظ اقتصادی و چه از لحاظ سازه ای و بهره برداری به مجموعه داشته باشد. در این تحقیق با استفاده از تحلیل غیر خطی و غیر مخرب سازه نوع خرابی و محل آن را با تقریب مناسبی نشان می‌دهیم.

در این تحقیق آزمایشگاهی نتایج دو تست برشی ارائه شده است، که در ابتدا بر اساس منابع آزمایشگاهی گذشته یک پایگاه داده عظیمی ایجاد گردیده است. یک مدل تحلیلی برای مکانیزم انتقال بار بین مواد تقویتی و بستر بتن مطرح شده است. در موازات آن، یک مدل انرژی شکست به منظور در نظر گرفتن اثر طول و عرض دور پیچ برای استحکام الیاف پیشنهاد شده است. به جهت تعیین عملکرد اتصال بین نوارهای پلیمری با سطح بتن، با ارائه دو مدل میتوان ابزاری نوآورانه ای را به منظور تعیین محدوده کامل رفتار اتصال چسب های CFRP با مواد شبه ترد نشان داد [2]. به همین منظور محل ایجاد تنش های نرمال کششی و تنش های ماکزیمم برشی که به علت جدا شدن نوار CFRP از سطح بتن رخ می‌دهد را مشخص نموده و مکانیزم شکست تعیین شده در اثر اعمال بارهای متفاوت را با نتایج آزمایشگاهی موجود مورد ارزیابی قرار داده که حاصل این امر تغییراتی نسبتاً یکسانی می‌باشد.

در زمینه آنالیز برشی و خمشی الیاف پلیمری اورتروپیکی استفاده شده در تیرهایی با ضخامت بسیار کم معادلات و مسئله‌های المان محدودی متعددی بیان شده است [3]. که از تقریب درجه دوم در حوزه جابجایی، بهره گرفته شده است. و اثرات کرنش برشی غیر یکنواخت پیچشی و خمشی را بر روی تیر تعیین گردیده و برای رسیدن به این مهم از چند جمله ای های درجه دوم و مکعب که از خانواده [HERMITIAN] می‌باشند استفاده شده است.

آنالیز عددی تیرها تحت بارهای فشاری و جانبی دقت و خواص همگرایی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. سرانجام این المان تیر برای آنالیز خمشی قاب های تقویت شده با ضخامت نازک در داخل صفحه و تحت بارهای جانبی مورد تایید قرار گرفته شده است. همچنین توجه خاصی در زمینه اثرات اعوجاج و تغییر شکل های برشی خارج از صفحه در شرایط محدود تیر بتنی شده است [4] روش دیگری که برای مطالعه کماتش سازه‌های تقویت شده با CFRP در برش و خمش به کار میرود موسوم به روش دورپیچ محدود، می‌باشد [5]. از آنجایی که نسبت مقاومت و مدول الاستیسیته مواد CFRP به مراتب بالاتر از فولاد است، مقاومت مصالح را نمی‌توان به عنوان یک معیار تأثیر گذار در تعیین محل کماتش تحت شرایط گسیختگی های موجود دانست. به طور کلی محل کماتش وابسته به شکل مقطع، خصوصیات ژئومتریک و مقاومت مصالح می‌باشد.

با توجه به استفاده از CFRP ظرفیت باربری تیر افزایش یافته و با توجه به مدلسازی مناسب و ساخت بتن به صورت مناسب نمودارهای ظرفیت باربری نمونه ها بسیار نزدیک به یکدیگر بوده است. با افزایش لایه های CFRP شاهد افزایش سختی و مقاومت خمشی می‌باشیم [6].

در سال های اخیر پیش از اینکه محققین بر روی عواملی از جمله چسب بین الیاف و سطح بتن تحقیقاتی صورت دهند، عده ای به منظور افزایش کارایی تیرهای تقویت شده با الیاف سعی به بررسی نحوه شکنندگی تیرهای تقویت شده و همچنین چگونگی گسترش ترک ها در میان دهانه تیر و همچنین انتهای تیر پس از گسیخته شدن تیر، نمودند [7].

بر این اساس نتایج بدست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی (چهار نمونه تیر و چهار نمونه دال) را با دو مدل المان محدود بدست آمده مقایسه نموده و در ضمن در هر بار افزایش بار حدود ۷۲-۳۵٪ از بار قبلی را بر نمونه تیر و دال قرار داده و پس از بارگذاری نتایج را باهم مقایسه نموده اند. این نتایج بدست آمده با نمونه FE که بر اساس مکانیک شکست غیر خطی طراحی شده است در زمینه‌های رفتار مواد، ترک بتن، و همچنین هندسه شکل تیر تحت مکانیک شکست مقایسه شده است. مدل اول بر اساس الگوی ترک ساده شده ی طراحی و مدل دوم بر اساس الگوی ترک نتایج آزمایشات طراحی شده است. در انتها نتایج حاکی از آن است که ترکها در اثر افزایش بار در میان دهانه و پس از جدا شدن الیاف CFRP آشکار می‌شوند.

گزارشی به منظور تعیین مدل سه بعدی همگن سازه بنایی به صورت مقیاس کامل با نوار های CFRP و آنالیز این مدل با روش اجزای محدود صورت پذیرفته است [9], [8].

پیش از این بیان شد که مدل هایی مانند تیرها و پل ها و نیز مصالح بنایی تقویت شده با الیاف CFRP را توسط افراد مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شده بود. فعالیت هایی برای کنترل الیاف پلیمری بکار رفته در تقویت انواع سازه ها صورت پذیرفت. این گروه بر این باور بودند که مقاومت سازه های تقویت شده با الیاف پلیمری به مقاومت اتصال سطح بین بتن و الیاف وابسته می باشد [10]. تأثیر سازه های مان ها علاوه بر رفتار کششی به رفتار برشی ترک های ظاهر شده در بتن نیز وابسته می باشد. مقایسه بین پیش بینی های این مدل با نتایج بدست آمده از آزمایش مربوطه نشان از آن دارد که ظرفیت و دقت اندازه گیری مدل المان محدود معرفی شده بسیار بالا می باشد. در اینجا مکانیزم گسیختگی الیاف پلیمری با نتایج بدست آمده از مدل FE بسیار شبیه هم می باشد و در پایان روشی به منظور تعیین محل گسیختگی الیاف پلیمری از سطح بتن با نتایج بدست آمده از مدل FE معرفی شده است. در جایی دیگر بر روی آنالیز استاتیکی خطی مخروط تقویت شده با الیاف پلیمری که این الیاف به صورت دایره های نازک بر سر مخروط قرار داده شده بودند که برای رسیدن به این منظور از المان پوسته های مرتبه دو و مرتبه اول تئوری تغییر شکل برشی استفاده شده است [10].

در همین رابطه تحقیقاتی بر روی تقویت اتصالات بتنی با مدل سه بعدی المان محدود، (Meso - scale) صورت پذیرفته، که این المان از نزدیکی سطح نصب شده انتخاب می شود (NSM) [11].

در سال های اخیر مطالعات فراوانی برای آنالیز سازه های تقویت شده با کامپوزیت های CFRP و با اشکال مختلف صورت پذیرفته است. در همین رابطه تلاش هایی به منظور آنالیز دینامیکی سازه های استوانه ای با مقطع توخالی که ممکن است سازه مورد نظر تحت تاثیر عوامل دینامیکی همچون باد، کابل های متصل به سازه و نیز اصابت وسایل نقلیه بر سازه مذکور قرار گیرد صورت پذیرفته است [12]. در اینجا می توان نشان داد که نتایج بدست آمده از روش حال حاضر با نتایج حاصل از مدل بدست آمده از نرم افزار ANSYS به صورت مطلوب و در شرایط یکسانی به سر می برند. در ضمن روش مورد نظر باعث کاهش زمان تحلیل نیز خواهد شد. در پاره ای از موارد که شرایط و طراحی ها ایجاب نماید می توان برای تقویت انواع تیر و ستونها از میلگردهای CFRP برای افزایش قابلیت اینگونه از سازه ها استفاده نمود [13]. در این تحقیق رفتار اتصال بین میلگرد و سطح تماسی بتن با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده و همچنین مدل های معرفی شده مورد بررسی قرار گرفته است. شش تیر توسط سه نوع الیاف پلیمری تقویت شده است [CFRP, GFRP, BFRP]. سطح میلگردهای CFRP, GFRP صاف می باشد و و نوع دیگر الیاف از نوع آجدار می باشد. رفتار سازه مورد آزمایش قرار گرفته با ویژگی های مختلفی در بردارنده خواص مدل های مورد نظر می باشد تحت تأثیر نوع میلگردها و سطح تماس بین بتن و میلگرد می باشد [13].

مدل سازی عددی نشان می دهد که افزایش شیب تنش- کرنش در سطح تماس بین دو ماده به نسبت لغزش بین الیاف و سطح بتن بستگی دارد. با افزایش عرض ورق های CFRP مقاومت خمشی، سطحی و شیب تغییر شکل الاستیک اولیه و لغزش CFRP بر روی سطح بتن تحت اثر بار نهایی بر سازه افزایش خواهد یافت. زمانی که عرض الیاف به مانند سطح تنش ها افزایش یابد لغزش کل کاهش خواهد یافت. به طور کلی می توان بیان نمود که لغزش سطحی با افزایش عرض ورق های پلیمری کاهش می یابد، و همچنین تورق سطحی بین CFRP و سطح بتن و نیز راندمان بهره وری صفحات پلیمری هم کاهش می یابد [14], [15].

نتایج عددی بر روی گسیختگی الیاف پلیمری از سطح بتن و توزیع فضایی میکرو ترک هایی که در بین الیاف و بتن صورت می- پذیرد، و همچنین چندین الگوی توزیع تنش و کرنش در صفحات پلیمری و بتن انجام شده است که تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی بدست آمده از آزمایشگاه دارد. مدل سازی های عددی نشان می دهد که روش عددی که در اینجا مورد مطالعه قرار گرفته است ابزار بسیار مفیدی برای افزایش درک از فرایند مکانیزم گسیختگی الیاف با بتن و همچنین قابلیت پیش بینی عملکرد مکانیکی و قابلیت اطمینان از این صفحات اعمال شده بر سازه های بتنی را دارا می باشد [16].

۲- روش تحقیق

۲-۱- هندسه تیر و نحوه آرماتورگذاری

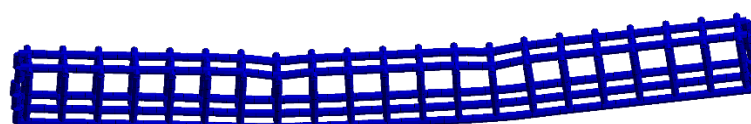
تمامی تیرهای مورد مقایسه با مدل سازی، در آزمایشگاه دانشگاه سمنان ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. ابعاد تیرهای مورد بررسی برابر $250 \times 250 \times 2100$ میلی متر می باشد. فولاد کششی نمونه ها شامل سه میلگرد $\Phi 14$ ، دو میلگرد $\Phi 14$ به عنوان فولاد فشاری استفاده گردید. مسلح کننده ی عرضی تیرها از تنگ های فولادی به قطر ۱۰ میلی متر که در فواصل ۱۰۰ میلی متری از یک-دیگر قرار گرفته اند، تشکیل شده است. فاصله ی بین تنگ های عرضی برابر با حداکثر مقدار تعیین شده توسط آیین نامه ی ACI 318-14 [17]، می باشد. برای اطمینان از عدم لغزش میلگردهای کششی، انتهای آن ها خم شده و به صورت قلاب ۹۰ درجه در آمد. از میان ۱۶ تیر مورد آزمایش، یک تیر بدون خرابی به عنوان نمونه ی مرجع و بقیه با ایجاد خرابی در میلگرد و بتن به صورت مشخص و همه نمونه ها با ورق های CFRP خارجی تقویت و آزمایش شدند.

نمونه ها پس از عمل آوری به صورت ۴ نقطه ای با استفاده از یک جک هیدرولیکی مورد آزمایش قرار گرفته اند. در ناحیه بین هر کدام از بارهای نقطه ای و نزدیکترین تکیه گاه به آن بار نیز می توان اثر توام خمش و برش را بررسی کرد. بارگذاری به صورت بار استاتیکی و یکنواخت انجام گرفت. تغییر مکان وسط تیر توسط LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) و نیرو توسط Load-Cell به دستگاه Logger-Data منتقل شدند و خیز تجربی تیرهای بتن مسلح مقاوم شده با CFRP در وسط دهانه برداشت شد. با استفاده از نمودار بار-تغییر مکان به دست آمده از آزمایش، خیز تیرها در سطوح مختلف بارگذاری و ظرفیت تیرهای تقویت شده با CFRP محاسبه گردید. همچنین در مراحل مختلف، مشاهدات ثبت و چگونگی گسترش ترک ها ترسیم شد تا چگونگی شکست تیر مشخص شود.

۲-۲- نام گذاری نمونه ها

نام نمونه هایی که با S آغاز می شود، که معرف Strengthened بوده که به معنای مقاوم سازی شده می باشد. حرف BD معروف کلمه Beam Damage بوده است. در ادامه حروف معرف چگونگی خرابی موجود در تیر می باشند. RA معرف خرابی در میلگرد در یک طرف (Rebars Aymmetric) و RS معرف خرابی در میلگرد در دو سمت به صورت متقارن می باشد. CM معرف خرابی در وسط بتن (Concrete Mid) و CO معرف خرابی بتن در یک سوم طولی آن می باشد (Concrete One-third). در ادامه اعداد به کار رفته میزان خرابی موجود در بتن را نمایش می دهد که در هنگام بتن ریزی با یونولیت کارگذاری شده است.

4/24/2021 9:00 PM



شکل ۱- نمایش میلگردهای طولی و خاموت های مدل شده تیر بتن آرمه

۲-۳- فرضیات به کار رفته در مدل سازی

- فرضیات زیر در مدل سازی تقویت خمشی مقطع بتنی با استفاده از ورق های CFRP به کار رفته اند.
- محاسبات طراحی بر اساس ابعاد واقعی موجود، نحوه استقرار میلگردها و ویژگی های مصالح عضو تقویت شده می باشند. کرنش در بتن و مصالح CFRP متناسب با فاصله آنها از محور خنثی است. به عبارتی شکل مقطع پیش و پس از بارگذاری تغییر نمی کند. هیچ نوع لغزش نسبی بین لایه ی CFRP و بتن رخ نمی دهد. (چسبیدگی بین آنها ۱۰۰٪ می باشد). فرض چسبندگی کامل CFRP به سطح بتن و عدم جداسازی در آن، به جهت عمکرد ۱۰۰ درصدی آن در نظر گرفته شده و در مدل سازی نمونه و طرح آزمایشگاهی نیز این مورد رعایت گردیده است.

رفتار کششی میلگردها با توجه به شکست خمشی آزمایش به میزان حداکثر طرح شده تا نمونه ها در زیر بار به گسیختگی برسند. تغییر شکل برشی در لایه چسب، با توجه به ضخامت کم آن، نادیده گرفته می شود. حداکثر کرنش فشاری بتن طبق آئین نامه آبا ۰/۰۰۳ فرض می شود.

-از مقاومت کششی بتن صرف نظر می شود.

-رابطه تنش - کرنش CFRP تا نقطه شکست آن. به صورت الاستیک و خطی فرض می شود.

۲-۴- الگوی تقویت و المانهای به کار رفته

در برنامه ANSYS برای مدل کردن بتن از المان Solid 186. برای مدل کردن آرماتور از Link180. برای مدل کردن CFRP از المان سطحی SHELL 181. برای مدل کردن خاموت از المان Beam 188 استفاده می شود و برای مدل کردن صفحات فلزی زیر تکیه گاه و در زیر بار متمرکز از المان Solid45 (برای کاهش تأثیر تمرکز تنش) استفاده می شود. مش بندی تیر های بتن آرمه، با توجه تحقیقات گذشته و مقالات بررسی شده، مربع با ضلع ۳۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

۲-۵- خصوصیات بتن

مشخصات مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری بتن برای تیر بتن آرمه کنترل به با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. و در نرم افزار مدل سازی این المان در برنامه ANSYS تحت عنوان المان Concrete مطرح است. یک المان ۸ گرهی است که هر گره ۳ درجه آزادی انتقالی در جهت X و Y و Z می باشد. المان حجمی بکار رفته برای بتن SOLID 186 می باشد.

۲-۶- الیاف CFRP و چسب رزین اپوکسی مخصوص آن

ورق های کامپوزیت استفاده شده در این آزمایش از نوع الیاف کربن (CFRP) هستند که محصول شرکت Quantum انگلستان و با نام تجاری Quantum Wrap C200 عرضه می شوند. چسب رزین اپوکسی مصرفی که به منظور چسباندن الیاف به سطح و همچنین اشباع کردن الیاف و ایجاد پیوستگی بین آنها استفاده شد نیز محصول شرکت Quantum است و با نام تجاری Quantum EPR 3301 عرضه می شود. این چسب از ترکیب کردن دو مایع A و B بدست می آید.

جدول ۱- مشخصات الیاف CEPR مصرفی

کرنش پارگی (%)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضخامت هر لایه (mm)	CFRP
۱/۵	۲۴۰	۴۹۵۰	۰/۱۱۱	(Quantum Wrap C200)
مدول خمشی (GPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضخامت هر لایه (mm)	CFRP
۳۰۰۰	۳/۵	۴۵	۰/۴	(Quantum EPR 3301)

مشخصات فیزیکی الیاف CFRP در نرم افزار مدل سازی به شرح جدول زیر می باشد:

جدول ۲: مشخصات فیزیکی در مدل سازی الیاف CFRP

کامپوزیت FRP	مدول الاستیسیته Mpa (ksi)	ضریب پواسون	مقاومت کششی Mpa (ksi)	مدول برشی Mpa (Ksi)	ضخامت هر لایه ورقه mm (in)
CFRP	$E_x=62000(9000)$ $E_y=4800(700)$ $E_z=4800(700)$	$\nu_{xy}=0.22$ $\nu_{xz}=0.22$ $\nu_{yz}=0.3$	958 (138)	$G_{xy}=3270(474)$ $G_{xz}=3270(474)$ $G_{zy}=1860(270)$	1.0 (0.040)

۲-۷- خصوصیات فولاد

فرض بر این است که فولاد یک ماده الاستو پلاستیک ایده آل کامل است.

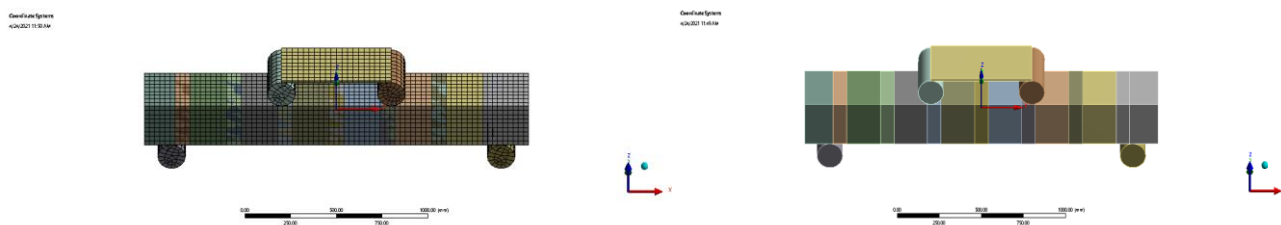
مدول الاستیسیته: $E_s=200000$ Mpa، تنش جاری شدن فولاد: $f_y=400$ Mpa، ضریب پواسون: $\nu=0.3$

۲-۸- بارگذاری و شرایط مرزی

همان گونه که در شکل ۲ نشان داده شده برای مدل های آزمایشگاهی در محل قرار گرفتن بارها ورق های فولادی برای جلوگیری از تمرکز تنش قرار گرفته شده است. همچنین در شکل ۳ شرایط مرزی مدل تئوری نشان داده شده است. که با توجه به تقارن تکیه گاه در جهت محور Z قابلیت جابجایی وجود داشته و در باقی جهت ها مسدود می باشد. مش بندی در نظر گرفته شده، مربع به ضلع ۳۰ میلی متر می باشد.



شکل ۲- نمونه آزمایشگاهی مرجع

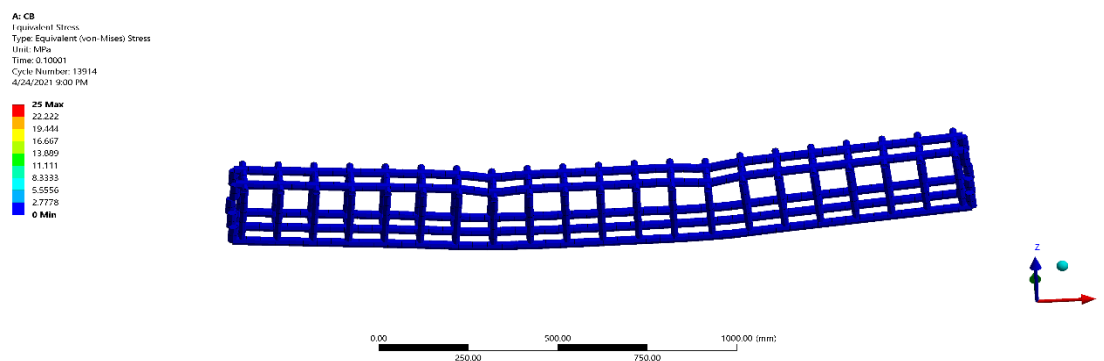


شکل ۳- شرایط تکیه گاهی تیر بتن آرمه مدل سازی شده

روند بارگذاری تیر بتن آرمه جهت رسم منحنی پوش تغییر مکان و بار به صورت کنترل تغییر مکان می باشد. بدین ترتیب که به انتهای سازه تا حدی که سازه به حداکثر ظرفیت خود برسد. تغییر مکان اعمال می کنند. دلیل این کار همگرا شدن بهتر نتایج تحلیل می باشد.

۳- مقایسه نتایج به دست آمده از آنالیز المان محدود و نتایج آزمایشگاهی

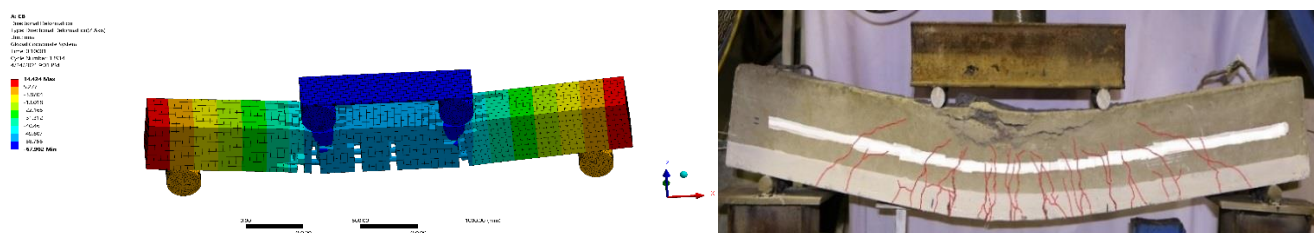
در این قسمت به مقایسه نتایج به دست آمده از آنالیز المان محدود و نتایج آزمایشگاهی می پردازیم. تیرهای بتن آرمه با وجود خرابی در بتن و میلگرد، با CFRP و یا بدون آن در نرم افزار ANSYS 2019 R3 مدل سازی شده و نتایج آن را با نتایج بدست آمده در آزمایشگاه مقایسه می کنیم. به صورت کلی تیر با ترکیب بتن و میلگرد به صورت زیر مدل سازی شده است.



شکل ۴- نمایش مدل سازی میلگرد در نرم افزار

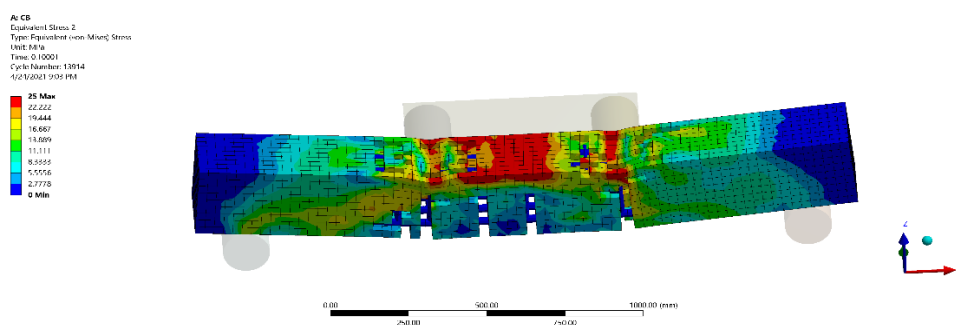
۳-۱ مدل سازی تیر بتن آرمه CB

در شکل ۵ براساس تجزیه تحلیل نمونه ساخته شده و پردازش به روش Explicit Dynamics میزان خیز نهایی در وسط تیر رخ داده است که مقدار آن ۶۷/۹ میلی متر میباشد. مقدار خیز تیر در محیط آزمایشگاهی به مقدار ۴۱،۶ بوده که به مقدار قابل قبولی می باشد.

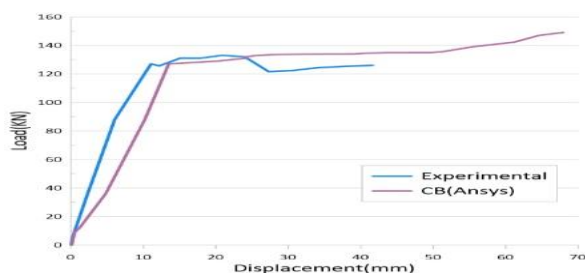


شکل ۵- نمایش تغییر مکان تیر CB

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود، تنش ایجاد شده در تیر موجب خرابی در وسط تیر گردیده، و المانهای مذکور را از بین می برد که در شکل نمایش داده شده به صورت حذف المان می باشد. در آزمایشگاه بر اساس تست صورت گرفته تیر بدون خرابی در میلگرد به ظرفیت نهایی خود می رسد و میلگرد داخل تیر سالم می ماند، این موضوع در مدل سازی نیز مشهود است.



شکل ۶- توزیع تنش در تیر CB

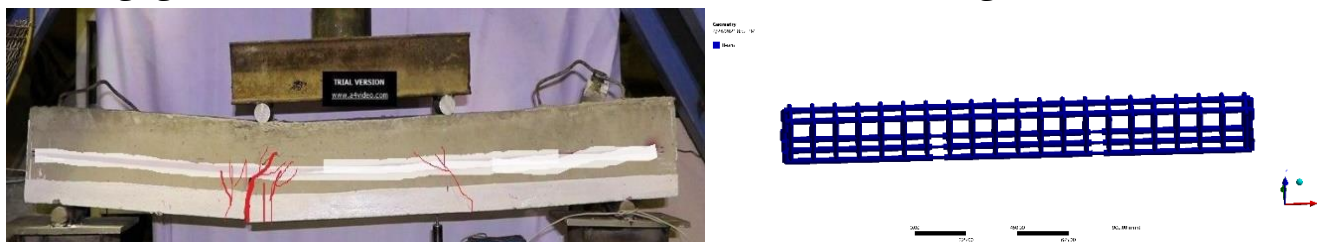


شکل ۷- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی تیر بتن آرمه CB

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نمودار نیرو جابجایی تیر CB نشان می‌دهد که تیر در محیط آزمایشگاهی تغییر مکان کمتر و همچنین مقدار نیروی کمتری را تحمل می‌کند. با توجه به این موضوع حداکثر نیرو تحمل شده در محیط آزمایشگاهی ۱۲۶ کیلو نیوتن بوده و در مدل سازی تیر ۱۴۹ کیلو نیوتن می‌باشد. که این موضوع را میتوان به علت ایده ال بودن مصالح و شرایط در محیط نرم افزار دانست.

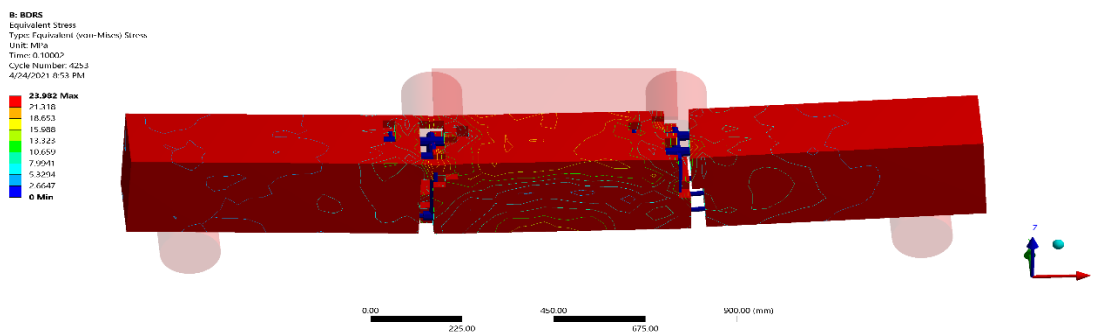
۲-۳ مدل سازی تیر بتن آرمه BDRS

تیر بتن آرمه BDRS دارای ۲ خرابی متقارن بر روی ۳ میلگرد وجه پایین مطابق شکل ۸ می‌باشد. خرابی اعمال شده در یک سوم دهانه طولی تیر به میزان نصف شدن قطر آرماتور طولی (از ۱۴ به ۷ میلی میتر) به مقدار ۲٫۵ سانت می‌باشد. همانطور که در شکل ۹ براساس تجزیه تحلیل نمونه ساخته شده و پردازش به روش Explicit Dynamics میزان خیز نهایی که مقدار آن ۲۵/۶۹ میلی متر می‌باشد. مقدار خیز تیر در محیط آزمایشگاهی به مقدار ۲۷/۸ بوده که به میزان ۸ درصد اختلاف را نشان می‌دهد که مقدار قابل قبولی می‌باشد.

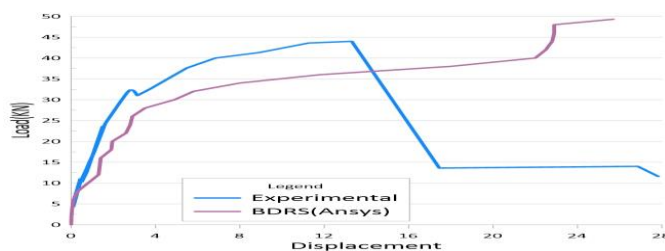


شکل ۸- مدل سازی خرابی میلگرد در تیر بتن آرمه BDRS

نیروی برشی Max به علت ترک زیاد در ناحیه شکست میلگرد، در همان ناحیه اتفاق می‌افتد و به علت از بین رفتن میلگرد میتوان مشاهده کرد که نقاط قرمز معلق در بیرون می‌باشند.



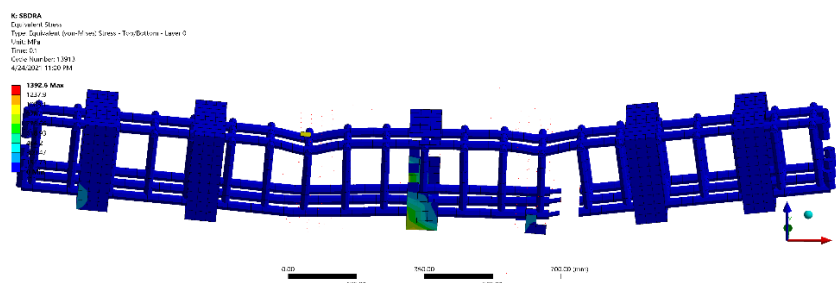
شکل ۹- توزیع تنش در تیر BDRS



شکل ۱۰- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی تیر بتن آرمه BDRS

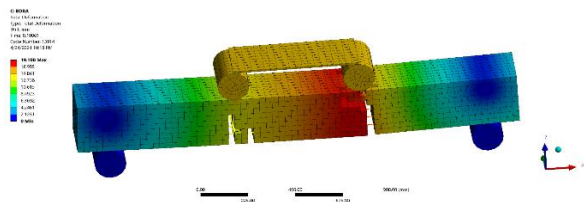
همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده میشود، در محیط آزمایشگاهی، تیر نیروی بیشتری را در جابجایی معین تحمل میکند و در یک شکست ناگهانی میلگرد اسیب دیده، نیرو کاهش شدید داشته و تا $13/3$ کیلو نیوتن پایین می‌آید. در مدل سازی صورت گرفته تیر در نیروی $49/3$ مقدار نهایی جابجایی را داشته است. که در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی بیشتر میباشد. دلیل تفاوت نمودارها را میتوان این دانست که در محیط آزمایشگاهی بعد از شکست میلگرد به روند بارگذاری ادامه داده شده است.

۳-۳ مدل سازی تیر بتن آرمه BDRA

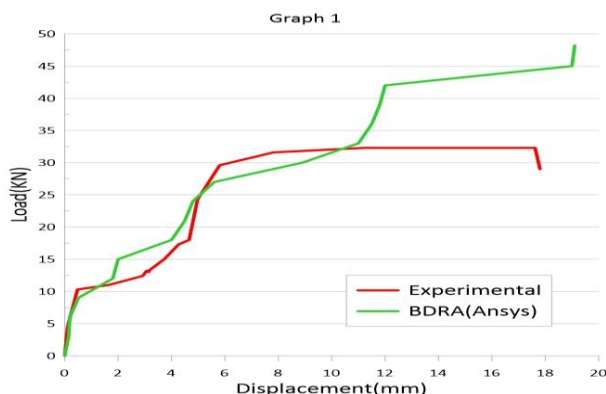


شکل ۱۱- مدل سازی خرابی میلگرد در تیر بتن آرمه BDRA

تیر بتن آرمه BDRA دارای ۱ خرابی بر روی ۳ میلگرد وجه پایین مطابق شکل ۱۲ می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۲ براساس تجزیه تحلیل نمونه ساخته شده و پردازش به روش Explicit Dynamics میزان خیز نهایی که مقدار آن $19/1$ میلی متر میباشد. مقدار خیز تیر در محیط آزمایشگاهی به مقدار $17/8$ بوده که به میزان ۷ درصد اختلاف رانسان میدهد که مقدار قابل قبولی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده میشود، خیز نهایی تیر در زیر میلگرد دارای خرابی رخ می‌دهد. و تا حدودی که قسمت بتنی آن رو به بالا حرکت میکند. همچنین میتوان نحوه رشد ترک در تیر BDRA را مشاهده که همانند نمونه آزمایشگاهی، از محل خرابی میلگرد شروع و رشد می‌کند. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در تیر به علت ضعف در میلگرد آن، بیشتر تنش‌ها در همان ناحیه خرابی میلگرد به وجود آمده و حذف شده است و در باقی قسمت‌های تیر ثابت می‌باشد.



شکل ۱۲- خیز تیر بتن آرمه BDRA

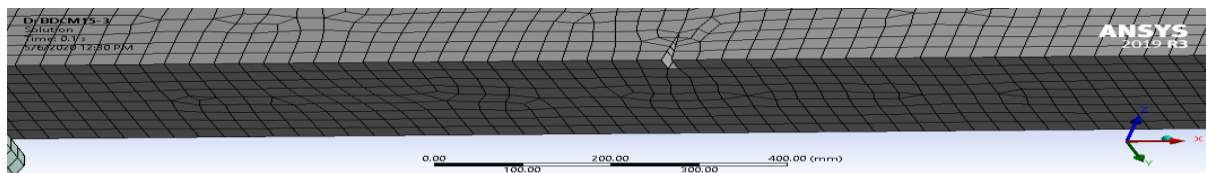


شکل ۱۳- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه BDRA

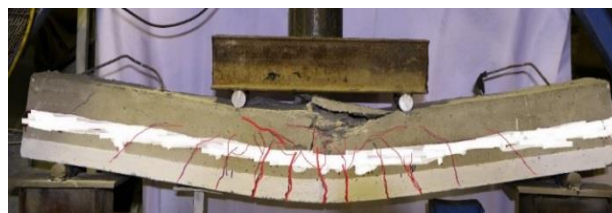
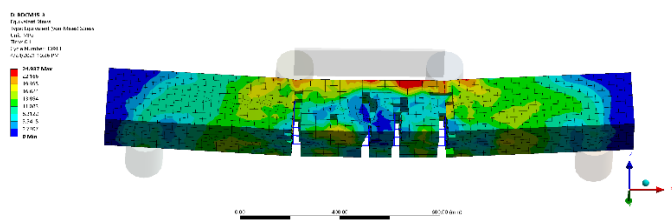
همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، در محیط آزمایشگاهی، تیر نیروی کمتری را در جابجایی معین تحمل میکند و در یک شکست ناگهانی میلگرد آسیب دیده، نیرو کاهش شدید داشته و تا ۲۹ کیلو نیوتن پایین می آید. در مدل سازی صورت گرفته تیر در نیروی ۴۸/۲ مقدار نهایی جابجایی را داشته است. که در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی بیشتر میباشد. نمودار های بدست آمده در ابتدا بسیار نزدیک به هم بوده اند و بعد از اعمال نیرو به میلگرد روند متفاوتی را تجربه میکنند. دلیل تفاوت نمودارها را میتوان این دانست که در محیط آزمایشگاهی بعد از شکست میلگرد به روند بارگذاری ادامه داده شده است.

۳-۴ مدل سازی تیر بتن آرمه BDCM15-3

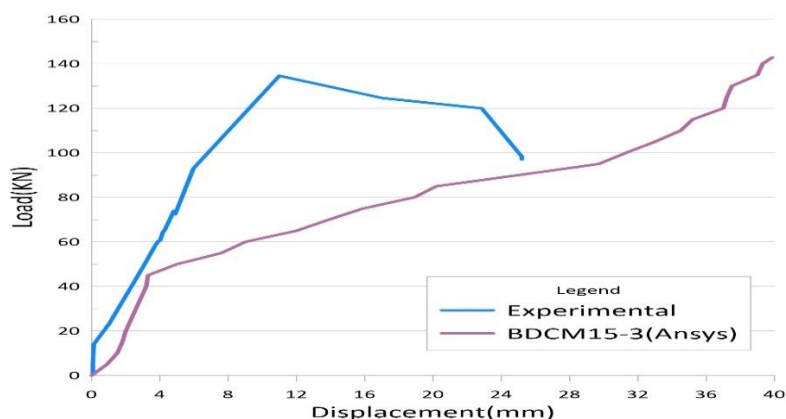
همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، خرابی مورد در وسط تیر ایجاد شده است. که بر اساس مقدار و اندازه خرابی، مش بندی نظم و ترتیب خود را بر اساس آن تنظیم کرده است. همچنین براساس تجزیه تحلیل نمونه ساخته شده و پردازش به روش Explicit Dynamics میزان خیز نهایی در وسط تیر رخ داده است که مقدار آن ۳۹/۸۶ میلی متر میباشد. مقدار خیز تیر در محیط آزمایشگاهی به مقدار ۲۵/۲ بوده است.



شکل ۱۴- خرابی مدل شده در تیر بتن آرمه BDCM15-3



شکل ۱۵- رشد ترک در تیر بتن آرمه BDCM15-3

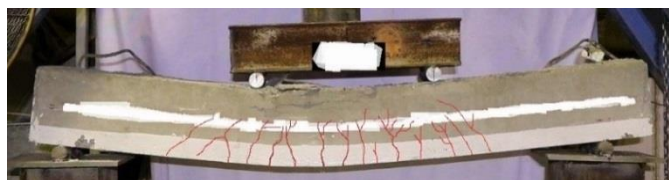
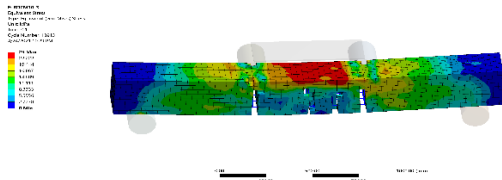


شکل ۱۶- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه BDCM15-3

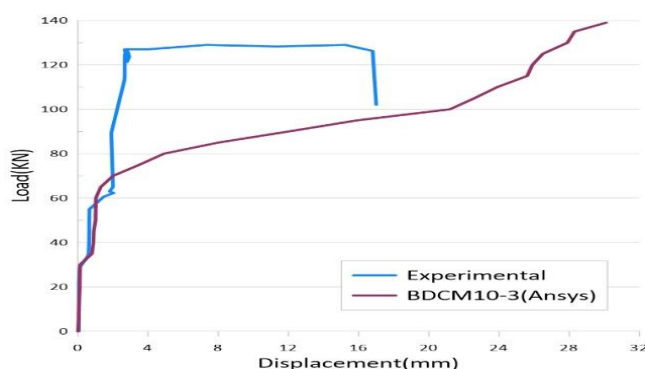
همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، بیشترین جابجایی در وسط تیر بوده که بر اساس فشار و جایگزینی منطقی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، در محیط آزمایشگاهی، تیر با استفاده از خیز کمتر به حداکثر باربری خود می‌رسد، در حالی که در نمونه مدل سازی این افزایش خیز با شیب ملایمتری می‌باشد. حداکثر نیروی قابل تحمل تیر در مدل سازی ۶ درصد بیشتر از نمونه آزمایشگاهی بوده ولی مقدار خیز بسیار بیشتر می‌باشد. نمودارهای بدست آمده در ابتدا بسیار نزدیک به هم بوده اند و بعد از اعمال نیروی بیشتر روند متفاوتی را تجربه می‌کنند. دلیل تفاوت نمودارها را میتوان این دانست که در محیط آزمایشگاهی شرایط محیطی تاثیرگذار است.

۳-۵ مدل سازی تیر بتن آرمه BDCM10-3

همانطور که نمونه قبلی مشاهده شده، خرابی مورد نظر در وسط تیر ایجاد شده است. که بر اساس مقدار و اندازه خرابی، مش- بندی نظم و ترتیب خود را بر اساس آن تنظیم کرده است. همچنین براساس تجزیه تحلیل نمونه ساخته شده و پردازش به روش Explicit Dynamics میزان خیز نهایی در وسط تیر رخ داده است که مقدار آن $30/19$ میلی متر میباشد. مقدار خیز تیر در محیط آزمایشگاهی به مقدار $16/8$ بوده است.



شکل ۱۷- تنش های ایجاد شده تیر بتن آرمه BDCM10-3

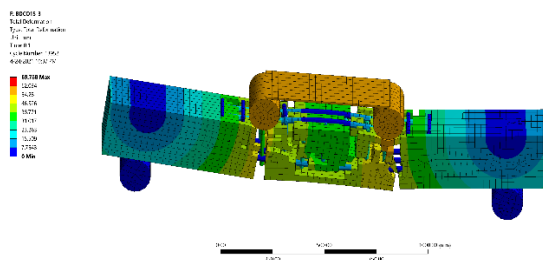


شکل ۱۸- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه BDCM10-3

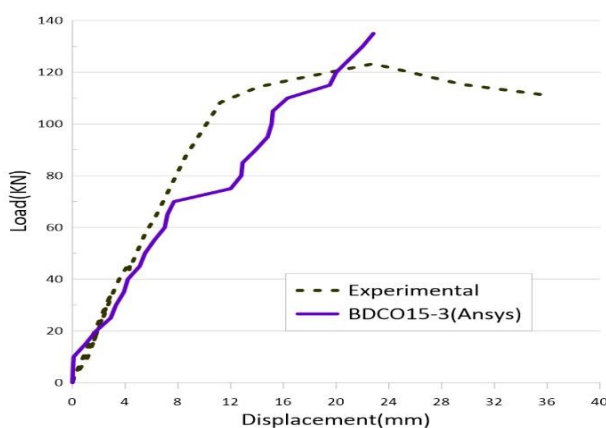
همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده میشود، در محیط آزمایشگاهی، تیر با استفاده از خیز کمتر به حداکثر باربری خود میرسد، در حالی که در نمونه مدل سازی این افزایش خیز با شیب ملایمتری می باشد. حداکثر نیروی قابل تحمل تیر در مدل سازی ۸ درصد بیشتر از نمونه آزمایشگاهی بوده ولی مقدار خیز بیشتر می باشد. نمودارهای بدست آمده در ابتدا بسیار نزدیک به هم بوده اند و بعد از اعمال نیروی بیشتر روند متفاوتی را تجربه میکنند. دلیل تفاوت نمودارها را میتوان این دانست که در محیط آزمایشگاهی شرایط محیطی تاثیرگذار است. همچنین نحوه اتصال و بتن ریزی و حتی بارگذاری میتواند مهم باشد.

۳-۶ مدل سازی تیر بتن آرمه BDCO15-3

همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می شود خرابی ایجاد شده در یک سوم طولی تیر می باشد. با توجه به وجود این خرابی مش بندی اطراف آن تحت تاثیر قرار می گیرد. لذا بارگذاری را می توان بر اساس آن متغییر دانست. همانطور که در شکل ۲۰ مشاهده می شود بیشترین خیز در به میزان ۲۲/۸۲ میلی متر می باشد که در آزمایشگاه، ۳۴/۵۸ میلی متر برآورد شده است. این مقدار اختلاف را میتوان به ادامه بارگذاری بعد از حداکثر نیرو نسبت داد. نکته ای که در این مسیر وجود دارد، در محیط آزمایشگاهی P ماکزیمم در مقدار خیز ۲۲/۸ میلی متر ایجاد شده است.



شکل ۱۹- توزیع تنش در تیر بتن آرمه BDCO15-3

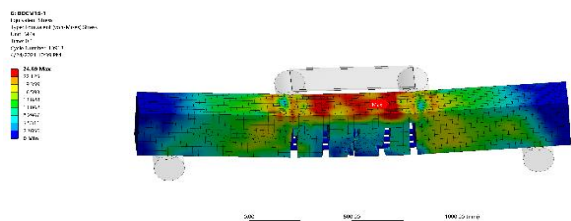


شکل ۲۰- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی تیر بتن آرمه BDCO15-3

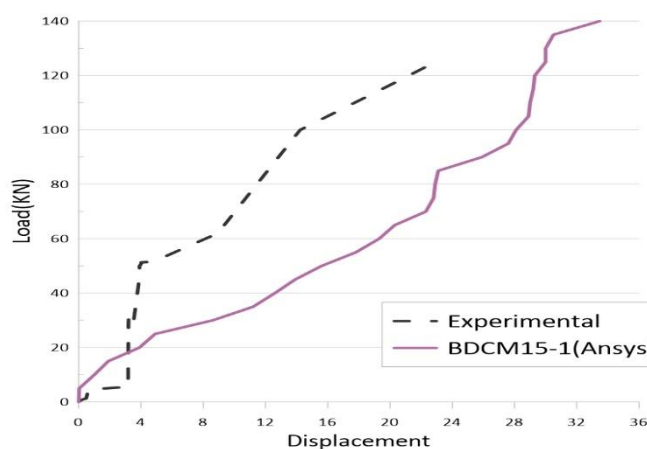
همانطور که در شکل ۲۰ مشاهده میشود، در محیط آزمایشگاهی، تیر با استفاده از خیز کمتر به حداکثر باربری خود میرسد، در حالی که در نمونه مدل سازی این افزایش خیز با شیب ملایمتری می باشد. حداکثر نیروی قابل تحمل تیر در مدل سازی ۱۱ درصد بیشتر از نمونه آزمایشگاهی بوده ولی مقدار خیز در لحظه بار نهایی یکسان می باشد. نمودارهای بدست آمده در ابتدا بسیار نزدیک به هم بوده اند و بعد از اعمال نیروی بیشتر روند متفاوتی را تجربه میکنند. دلیل تفاوت نمودارها را میتوان این دانست که در محیط آزمایشگاهی شرایط محیطی تاثیرگذار است. همچنین نحوه اتصال و بتن ریزی و حتی بارگذاری میتواند مهم باشد. در نمودار آزمایشگاهی تیر میتوان مشاهده نمود که تیر بعد از رسیدن به حداکثر باربری خود خیز داشته، هرچند با کاهش نیروی قابل تحمل.

۳-۷ مدل سازی تیر بتن آرمه BDCM15-1

مدل سازی و پردازش تیر BDCM15-1 با استفاده از روش Explicit Dynamics انجام شده است که نتایج آن به تفکیک در شکل های زیر مشاهده میشود. با توجه به شکل ۲۱ حداکثر خیز تیر در ناحیه پایین قرار داشته و نزدیک محل خرابی تیر. با توجه به این امر میزان خیز از نمونه آزمایشگاهی بیشتر می باشد.



شکل ۲۱- توزیع تنش در تیر بتن آرمه BDCM15-1

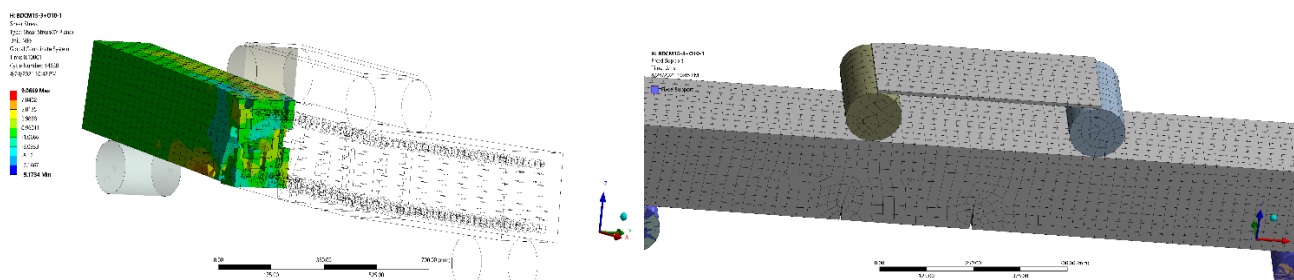


شکل ۲۲- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه BDCM15-1

همانطور که در شکل ۲۲ مشاهده میشود، در محیط آزمایشگاهی، تیر با استفاده از خیز کمتر به حداکثر باربری خود میرسد، در حالی که در نمونه مدل سازی این افزایش خیز با شیب ملایمتری می باشد. هر چند نیروی اعمال شده بیشتری توسط تیر مدل سازی شده به میزان ۱۳ درصد، تحمل شده است. مقدار خیز در لحظه بار نهایی یکسان نمی باشد. نمودارهای بدست آمده در ابتدا تا حدودی نزدیک به هم بوده اند و بعد از اعمال نیروی بیشتر روند متفاوتی را تجربه می کنند. دلیل تفاوت نمودارها را میتوان این دانست که در محیط آزمایشگاهی شرایط محیطی تاثیرگذار است. همچنین نحوه اتصال و بتن ریزی و حتی بارگذاری میتواند مهم باشد. در نمودار آزمایشگاهی تیر میتوان مشاهده نمود که تیر بعد از رسیدن به حاکثر باربری خود خیز داشته است.

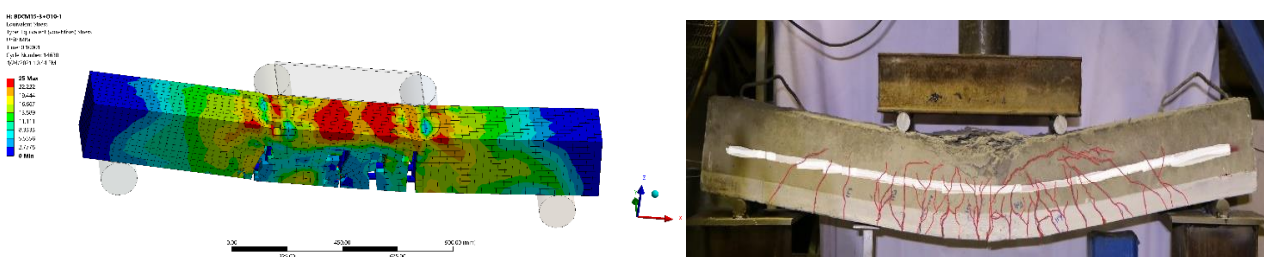
۳-۸ مدل سازی تیر بتن آرمه BDCM15-3+O10-1

همانطور که در شکل ۲۳ مشاهده می شود، خرابی در ۲ مقطع تیر بر اساس نمونه آزمایشگاهی نمایش ایجاد شده است. با توجه به این خرابی مش بندی اطراف آن تغییر یافته است. در این تیر با اعمال بار و نیرو حداکثر خیز ۳۹/۸۶ میلی متر می باشد.

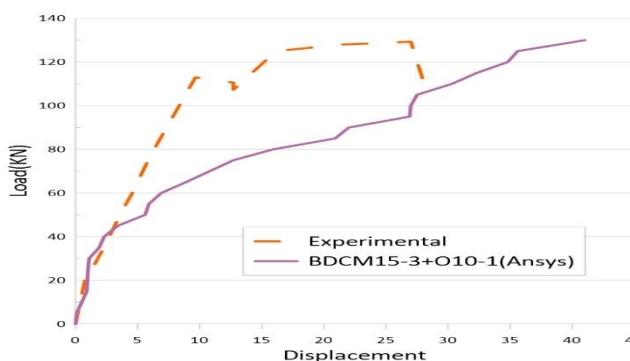


شکل ۲۳- مدل سازی خرابی در تیر بتن آرمه BDCM15-3+O10-1 شکل ۲۴- خرابی در درون تیر بعد از اعمال خرابی BDCM15-3+O10-1

در شکل بالا تنش در محل خرابی افزایش یافته و موجب از بین رفتن بتن میگردد، که در مدل سازی با حذف آن المان این موضوع مشخص میگردد. رشد ترک در نمونه مشخص است. بیشتر آن مربوط به ترک یک سوم بوده و افزایش یافته است.



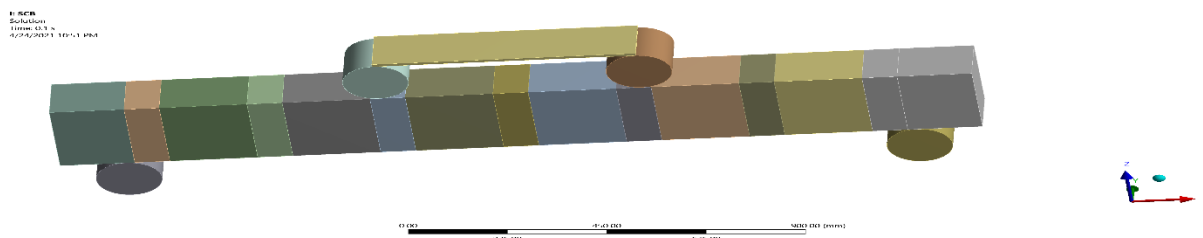
شکل ۲۵- توزیع تنش در تیر بتن آرمه BDCM15-3+O10-1



شکل ۲۶- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه BDCM15-3+O10-1

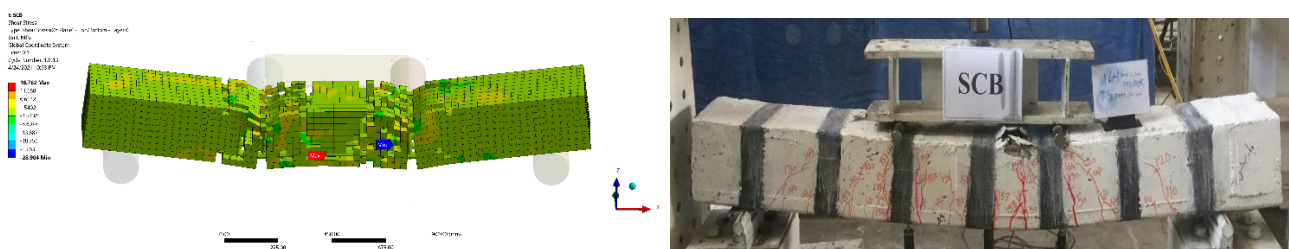
۳-۹ مدل سازی تیر بتن آرمه SCB

با توجه به شکل ۲۷ تیر بتن آرمه بدون خرابی در بتن و میلگرد نمایش داده شده است. ۷ کامپوزیت به صورت مساوی سرتاسر تیر وجود دارد. خرابی CFRP زیر محل اعمال بار در شکل ۲۷ مشاهده میشود.

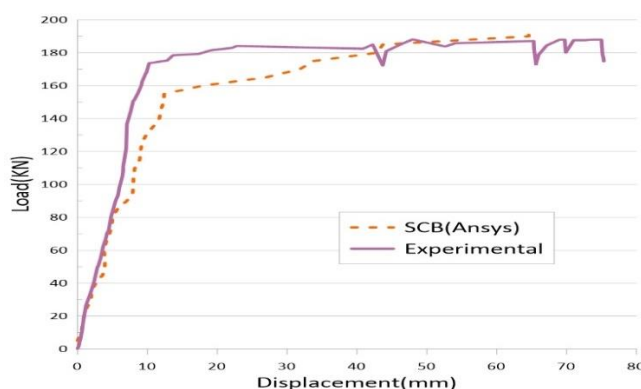


شکل ۲۷ نمایش تیر بتن آرمه SCB

باتوجه به شکل ۲۸ خیز تیر در مدل سازی انجام شده ۶۴/۶ میلی متر و خیز بدست آمده در محیط آزمایشگاهی ۷۵/۳۲ میلی متر می باشد. همانطور که مشخص است خرابی اکثرا در زیر تیر بوده و کامپوزیت ها متحل این اعمال نیرو شده و در اثر آن گسسته میشوند.



شکل ۲۸- خیز تیر بتن آرمه SCB

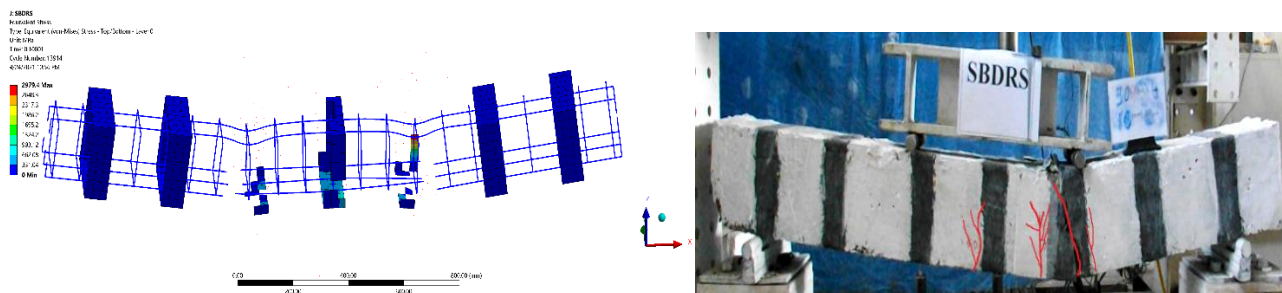


شکل ۲۹- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه SCB

با توجه به شکل ۲۹ مشاهده میشود در نمودار آزمایشگاهی تیر SCB خیز بیشتری را در انتهای کار تحمل میکند، که به علت ادامه رود بارگذاری می باشد. ولی در مدل سازی انجام شده، مقدار خیز در ازای نیروی یکسان بیستر بوده ولی مقدار نهایی آن کمتر از آزمایشگاهی می باشد. به طور کلی روند نمایش هر ۲ نمودار مشابه یکدیگر می باشد.

۳-۱۰ مدل سازی تیر بتن آرمه SBDRS

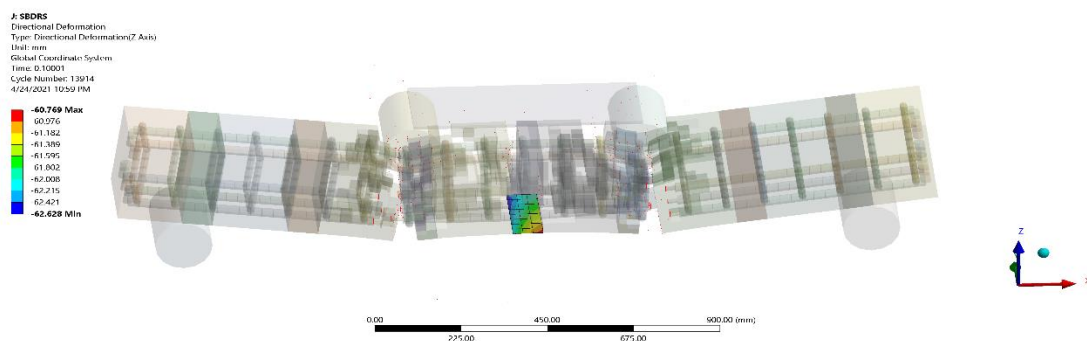
همانطور که در شکل ۳۰ مشاهده میکنید، با توجه به نمونه آزمایشگاهی، خرابی متقارنی را در دو سمت میلگرد به صورت مساوی قرار داده شده و CFRP را به صورت محصور شدگی در اطراف بتن اجرا می کنیم.



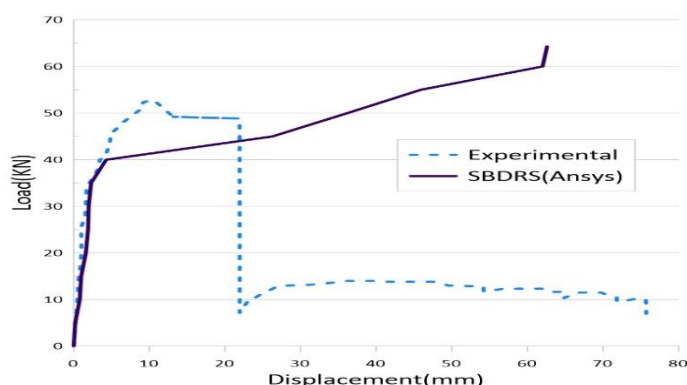
شکل ۳۰- رفتار تیر SBDRS پس از پس از بارگذاری

با توجه به شکل بالا، پس از تحمل نیرو میلگرد های موجود با خرابی های ایجاد شده، دچار پارگی شده و CFRP های نزدیک آن ها نیز کاملا متلاشی شده اند. همچنین کامپوزیت موجود در وسط تیر نیز در حدود بسیاری دچار گسیختگی شده است.

شکل ۳۱ نمایش خیز تیر در وسط تیر را نشان می دهد. که بیشترین آن ۶۲/۶۲ میلی متر می باشد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی تیر، که مقدار خیز در نیروی ۲۲ کیلونیوتن به مقدار ۴۸/۸ میلی متر رسیده و در انتهای بارگذاری، عدد ۷۵/۷ میلی متر را نشان می دهد.



شکل ۳۱- رشد ترک در تیر بتن آرمه SBDRS

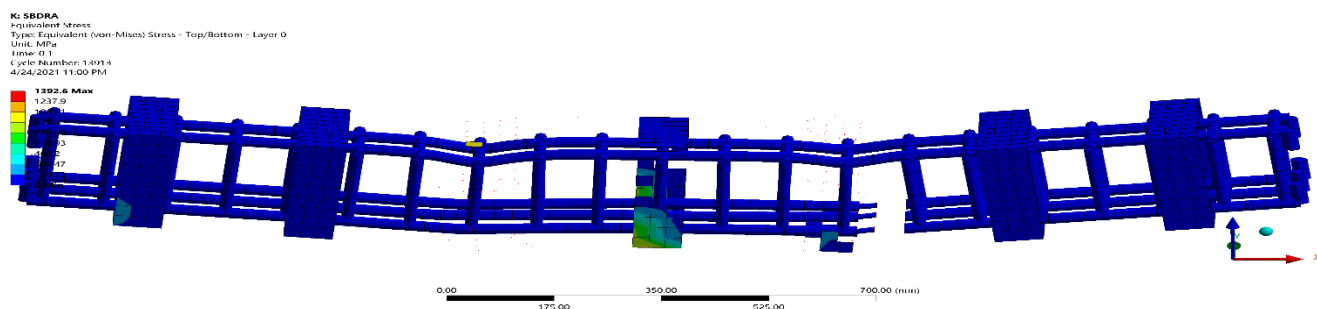


شکل ۳۲- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه SBDRS

با توجه به نمودار بالا مشاهده می‌شود که تیر مدل سازی شده در ابتدا همانند مدل سازی پیش رفته، و در یک نیرویی به بعد فاصله گرفته شده و نیروی بیشتری را تحمل می‌کند. دلیل این موضوع را میتوان، تقارن و هماهنگی کامل تیر دانست. که هر ۲ محل خرابی خراب شده و نیروی بیشتری را تحمل می‌کند، ولی در نمونه آزمایشگاهی، تیراز یک سمت شکسته شده و نیروی کمتری را تحمل می‌کند.

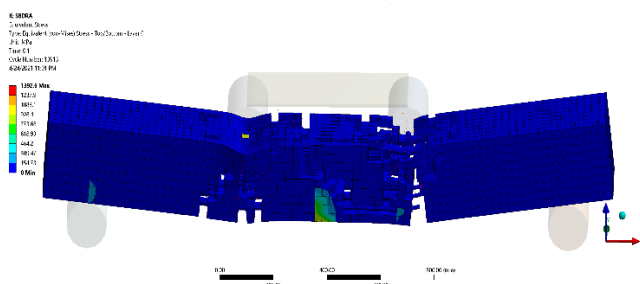
۳-۱۱ مدل سازی تیر بتن آرمه SBDRA

همانطور که در شکل ۳۳ مشاهده میکنید، با توجه به نمونه آزمایشگاهی، خرابی را در یک سمت میلگرد به صورت مساوی قرار داده شده و CFRP را محصور شده در اطراف بتن اجرا می‌کنیم.

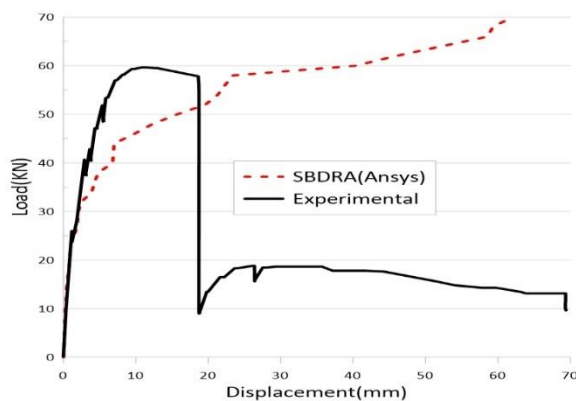


شکل ۳۳- رفتار تیر SBDRA پس از بارگذاری

با توجه به شکل ۳۴ تیر بتن آرمه SBDRA پس از اعمال بارگذاری با خرابی میلگردهای ضعیف شده مواجه می‌شود. و از همین ناحیه گسسته می‌شود. CFRP استفاده شده در محل بارگذاری تیر با خرابی کامل و سایر آن ها سالم می‌باشند. با مشاهده در تیر بالا خرابی در محل اعمال خرابی به شدت افزایش یافته، موجب از بین رفتن بتن و همچنین گسیختگی میلگرد شده و سایر ترک‌ها در محل دیگر بارگذاری و همچنین وسط تیر رو به افزایش است.



شکل ۳۴- نمایش خیز تیر بتن آرمه SBDRA

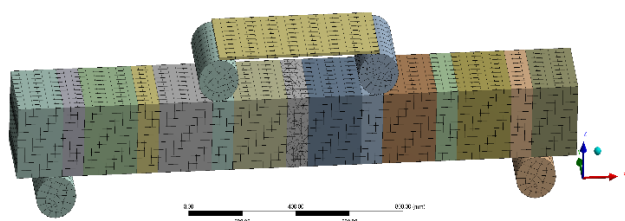


شکل ۳۵- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه SBDRA

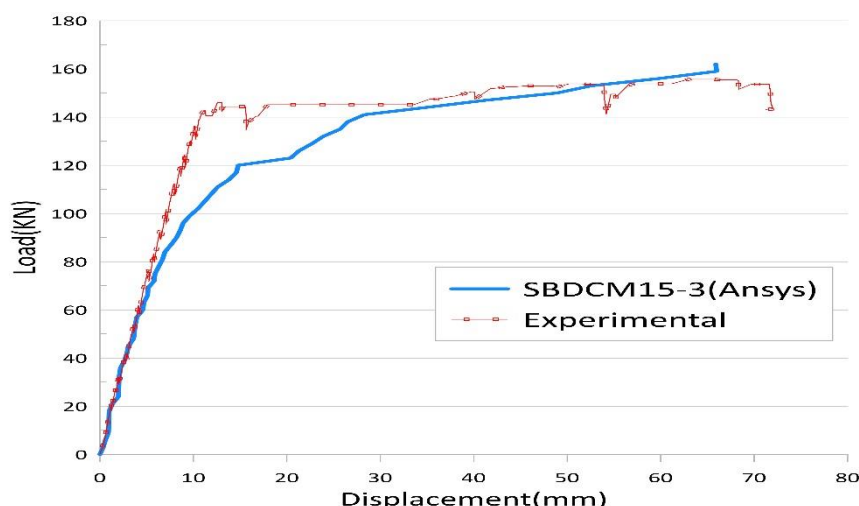
در تیر بتن آرمه SBDRA در محیط آزمایشگاهی، بیشترین نیروی قابل تحمل $59/7$ کیلونیوتن بوده که در این مقدار نیرو خیز تیر 13 میلی متر می باشد و با ادامه بارگذاری مقدار خیز تا 70 میلی متر میرسد هرچند نیروی بسیار کمتری را تحمل میکند.

۳-۱۲ مدل سازی تیر بتن آرمه SBDRCM15-3

خرابی ایجاد شده در وسط تیر و همزمان با استفاده از کامپوزیت CFRP نشان داده شده است. با توجه به خرابی به صورت مساوی از ۲ طرف تیر می توان CFRP های استفاده شده را مشاهده کرد. همانطور که در شکل ۳۶ مشاهده می شود، خیز تیر در مدل سازی انجام شده به میزان $65/98$ میلی متر می باشد. در محیط آزمایشگاهی مقدار به $74/3$ میلی متر رسیده است. با توجه به خرابی در وسط تیر، بیشترین نقاط از بین رفته در وسط تیر می باشد.



شکل ۳۶- نمایش رشد ترک در تیر بتن آرمه SBDRCM15-3

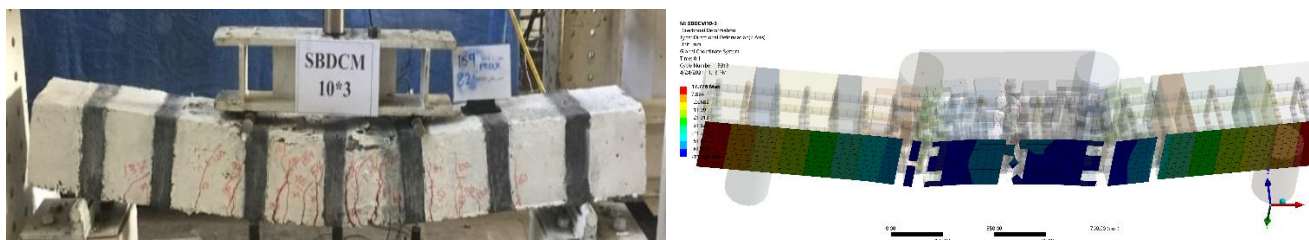


شکل ۲۷- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه SBDCM15-3

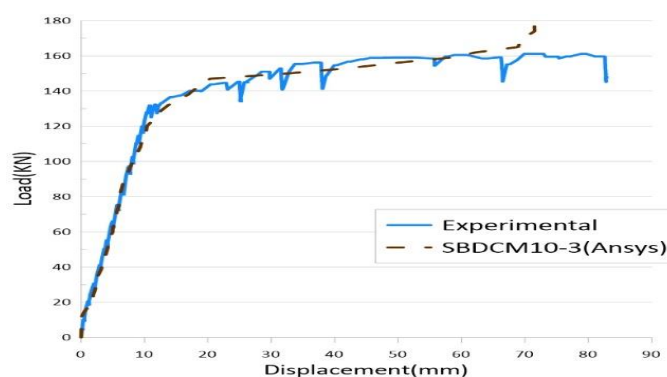
همانطور که در نمودارهای آزمایشگاهی و مدل سازی میتوان مشاهده کرد، روند هر ۲ در اوایل به یک شکل بوده و تا رسیدن به نقطه پیک نمونه مدل سازی در یک جابجایی یکسان نیروی کمتری را نشان می‌دهد. سپس با افزایش نیرو این مقدار نیرو افزایش یافته است. با این وجود اختلاف اندکی بین نیرو و جابجایی بین ۲ نمونه وجود دارد.

۳-۱۳ مدل سازی تیر بتن آرمه SBDCM10-3

تیر بتن آرمه SBDCM10-3 با خرابی در وسط تیر و با استفاده از CFRP مدل سازی شده، و با توجه به اعمال نیروی انجام شده بیشترین خیز به وجود آمده در تیر بر اساس مدل سازی ۷۱/۵۲ میلی متر می‌باشد. که این تیر در محیط آزمایشگاهی به خیز ۸۲/۷۶ رسیده است.



شکل ۲۸- نمایش خیز تیر بتن آرمه SBDCM10-3

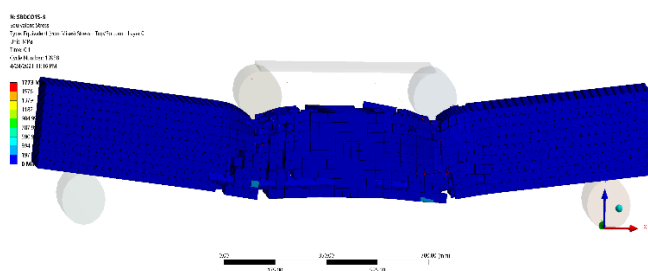


شکل ۲۹- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه SBDCM10-3

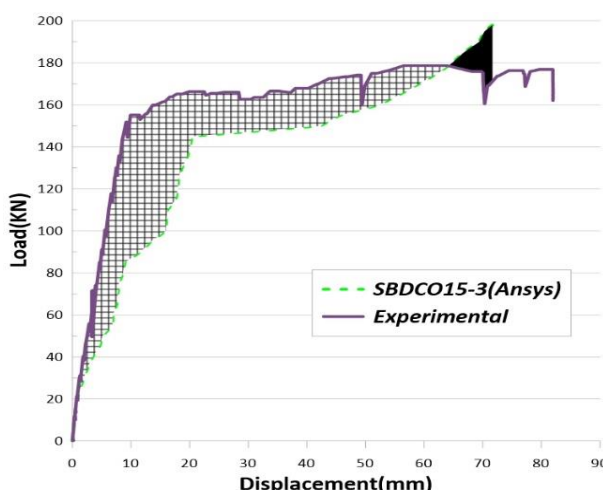
همانطور که در نمودارهای آزمایشگاهی و مدل سازی میتوان مشاهده کرد، روند هر ۲ در اوایل به یک شکل بوده و تا رسیدن به نقطه پیک نمونه مدل سازی در یک جابجایی یکسان نیروی کمتری را نشان می دهد. حداکثر نیروی بدست آمده در آزمایشگاه ۱۶۱/۶ کیلو نیوتن بوده و مقدار جابجایی بیشینه ۸۲/۷۶ میلی متر میباشد. که در مدل سازی مقدار جابجایی ۷۱/۵۲ میلی متر بوده است. سپس با افزایش نیرو این مقدار نیرو افزایش یافته است. با این وجود اختلاف اندکی بین نیرو و جابجایی بین ۲ نمونه وجود دارد.

۳-۱۴ مدل سازی تیر بتن آرمه SBDCO15-3

تیر بتن آرمه SBDCO15-3 با خرابی در یک سوم تیر و استفاده از کامپوزیت CFRP مدل سازی شده است. با توجه به اعمال نیروی انجام شده بیشترین خیز به وجود آمده در تیر بر اساس مدل سازی ۷۱/۶۶ میلی متر می باشد. که این تیر در محیط آزمایشگاهی به خیز ۸۲ میلی متر رسیده است.



شکل ۴۰- نمایش خیز تیر بتن آرمه SBDCO15-3

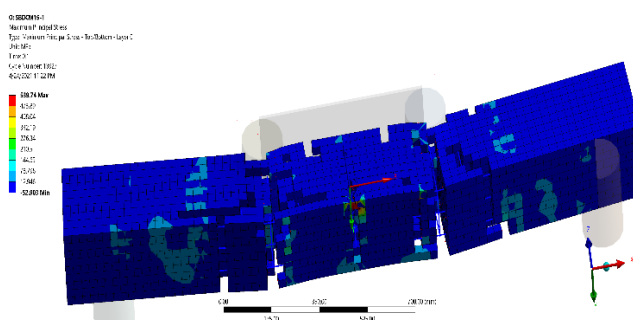


شکل ۴۱- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی تیر بتن آرمه SBDCO15-3

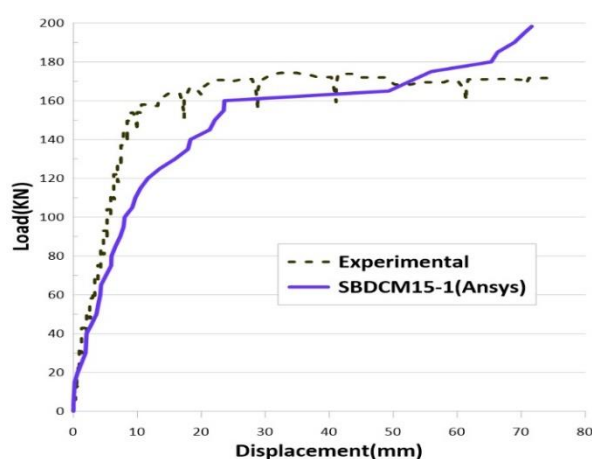
با توجه به شکل ۴۰ مشاهده میشود که خیز در منطقه ایجاد خرابی به بالاترین حد رسیده و بیشتر خرابی ایجاد شده از همانجا شروع شده است. شکل ۴۱ نشان میدهد که در بین نمودار نمونه آزمایشگاهی و مدل سازی تفاوت زیادی وجود دارد. در نمونه آزمایشگاهی ابتدا به بیشترین مقدار خود رسیده و سپس افزایش خیز میدهد ولی در نمونه مدل سازی در انتهای بارگذاری به حداکثر جابجایی خود می رسد.

۳-۱۵ مدل سازی تیر بتن آرمه SBDCM15-1

تیر بتن آرمه SBDCM15-1 با خرابی در وسط تیر و استفاده از کامپوزیت CFRP مدل سازی شده است. با توجه به اعمال نیروی انجام شده بیشترین خیز به وجود آمده در تیر بر اساس مدل سازی ۷۱،۶۳ میلی متر می باشد. که این تیر در محیط آزمایشگاهی به خیز ۷۵ میلی متر رسیده است.



شکل ۴۲- نمایش رشد ترک در تیر بتن آرمه SBDCM15-1



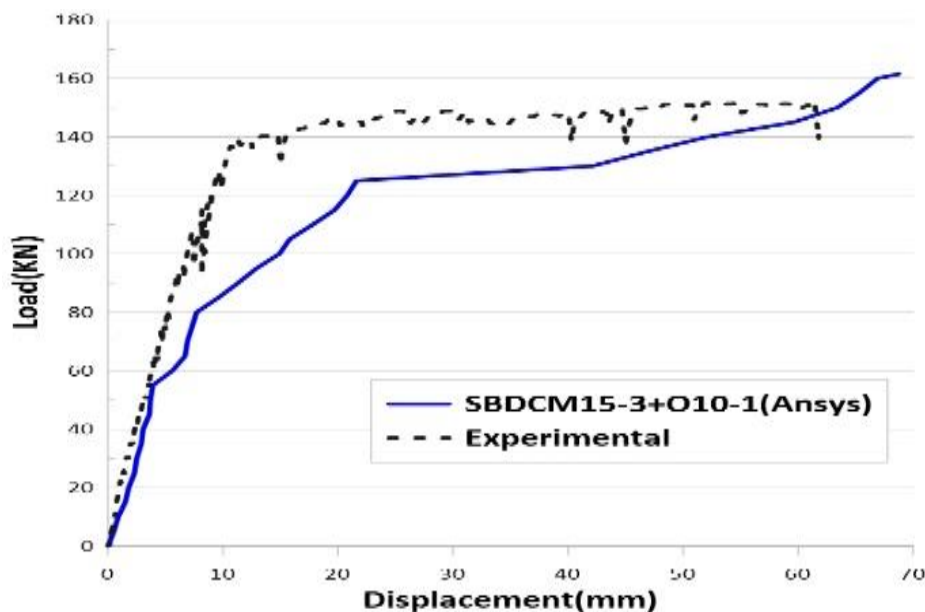
شکل ۴۳- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی تیر بتن آرمه SBDCM15-1

۳-۱۶ مدل سازی تیر بتن آرمه SBDCM15-3+O10-1

تیر بتن آرمه دارای ۲ خرابی در وسط و یک سوم طول تیر، با شرایط مشابه به آزمایشگاهی مدل سازی شده است. همانطور که در شکل زیر مشاهده میشود مش بندی با توجه به تغییرات در بتن با ایجاد خرابی متفاوت است. تیر با وجود خرابی ایجاد شده با CFRP به صورت نوار محصور شده است.

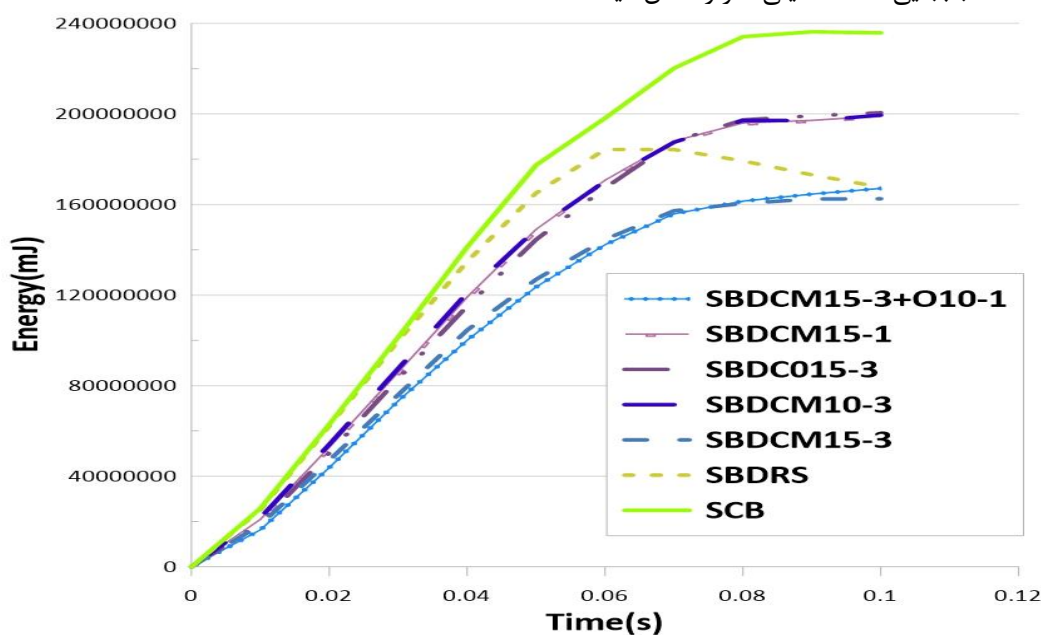


شکل ۴۴- نمودار انرژی تیر بتن آرمه SBDCM15-3+O10-1



شکل ۴۵- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر بتن آرمه SBDCM15-3+O10-1

تیر بتن آرمه SBDCM15-3+O10-1 با خرابی در وسط تیر و یک سوم طول تیر و با استفاده از کامپوزیت CFRP مدل سازی شده است. با توجه به اعمال نیروی انجام شده بیشترین خیز به وجود آمده در تیر بر اساس مدل سازی ۶۸/۷۵ میلی متر می باشد. که این تیر در محیط آزمایشگاهی به خیز ۶۱/۷۹ میلی متر رسیده است. بیشینه نیرو تحمل شده توسط تیر در آزمایشگاه ۱۵۱/۴۵ کیلونیوتن می باشد که در این لحظه جابجایی ۵۴/۹۹ میلی متر را نشان می دهد.



شکل ۴۶- مقایسه انرژی تیرهای دارای CFRP

۴- نتایج مدل سازی تیر های بتن آرمه

- ۱- مدل سازی تیر های بتنی براساس سه قسمت از تیر صورت پذیرفته، بتن، میلگرد و کامپوزیت CFRP می باشد. در اکثر نمودار های بدست آمده از نرم افزار جهت ترسیم نمودار بار تغییر مکان، ابتدا در شروع نمودار بسیار نزدیک به یکدیگر بوده اما با افزایش میزان بار، جابجایی مورد نظر تیر نیز بیشتر شده است.
- ۲- در تیرهای مدل سازی شده، که خرابی میلگرد (خوردگی) را نشان میدهد، خرابی و رشد ترک به شدت از همان ناحیه شروع شده و نشان داده می شود. و همچنین نمودار های بار تغییر مکان مقایسه شده با نمونه آزمایشگاهی دارای افت کمتری می باشد که دلیل آن ادامه دادن بارگذاری بعد از شکست تیر در محیط آزمایشگاهی می باشد.
- ۳- در تمامی تیر های مدل سازی شده رشد ترک ها بسیار نزدیک به نمونه آزمایشگاهی می باشد. با استفاده از سرعت و جهت رشد آن ها برای تشخیص میزان و نوع خرابی بکار می رود.
- ۴- در تیرهای شاهد با (CB&SCB) وجود تحمل بار بیشتر نسبت به سایر تیرها ولی اختلاف در جابجایی کمتری را شاهد هستیم.
- ۵- استفاده از کامپوزیت CFRP در تمامی نمونه های دارای آن، چه در محیط آزمایشگاهی و چه مدل سازی موجب افزایش میزان باربری و جابجایی وسط تیر به میزان متوسط ۱۹ درصد شده است.
- ۶- انرژی تیرهای دارای کامپوزیت از نمونه های بدون کامپوزیت بیشتر می باشد. و البته تیر بدون خرابی دارای کامپوزیت از تمامی آن ها بیشتر و نوع عملکرد آن بهتر می باشد.

مراجع:

- [1] A. Godat, P. Labossière, K. W. Neale, and O. Chaallal, "Behavior of RC members strengthened in shear with EB FRP: Assessment of models and FE simulation approaches," *Comput. Struct.*, vol. 92–93, pp. 269–282, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.compstruc.2011.10.018.
- [2] P. Carrara and D. Ferretti, "A finite-difference model with mixed interface laws for shear tests of FRP plates bonded to concrete," *Compos. Part B Eng.*, vol. 54, pp. 329–342, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.05.030.
- [3] F. Minghini, N. Tullini, and F. Laudiero, "Buckling analysis of FRP pultruded frames using locking-free finite elements," *Thin-Walled Struct.*, vol. 46, no. 3, pp. 223–241, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.tws.2007.09.001.
- [4] A. Hosseini and D. Mostofinejad, "Effect of groove characteristics on CFRP-to-concrete bond behavior of EBROG joints: Experimental study using particle image velocimetry (PIV)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 364–373, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.036.
- [5] H. Amoushahi and M. Azhari, "Buckling of composite FRP structural plates using the complex finite strip method," *Compos. Struct.*, vol. 90, no. 1, pp. 92–99, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.compstruc.2009.02.006.
- [6] M. Madqour and H. Hassan, "Experimental and analytical investigations of reinforced concrete beams strengthened by different CFRP sheet schemes," *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 15, no. 56, pp. 123–136, 2021.
- [7] G. Camata, E. Spacone, and R. Zarnic, "Experimental and nonlinear finite element studies of RC beams strengthened with FRP plates," *Compos. Part B Eng.*, vol. 38, no. 2, pp. 277–288, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.compositesb.2005.12.003.
- [8] G. Milani, "3D FE limit analysis model for multi-layer masonry structures reinforced with FRP strips," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 52, no. 6, pp. 784–803, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2010.01.004.
- [9] H. N. G. Al-Maliki, M. M. Abbass, and J. J. Al-kaabi, "Simulation Nonlinear of Structural Behavior of Hollow Reinforced Concrete Deep Beams Strengthened By CFRP.," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 928, no. 2, p. 22119.
- [10] J. G. Teng, S. S. Zhang, J. G. Dai, and J. F. Chen, "Three-dimensional meso-scale finite element modeling of bonded joints between a near-surface mounted FRP strip and concrete," *Comput. Struct.*, vol. 117, pp. 105–117, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.compstruc.2012.12.002.
- [11] S. M. R. Khalili and B. Saboori, "Transient dynamic analysis of tapered FRP composite transmission poles using finite element method," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 2, pp. 275–283, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.compstruc.2009.07.026.
- [12] X. Lin and Y. X. Zhang, "Bond-slip behaviour of FRP-reinforced concrete beams," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 110–117, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.023.
- [13] A. Caggiano and D. Said Schicchi, "A thermo-mechanical interface model for simulating the bond behaviour of FRP strips glued to concrete substrates exposed to elevated temperature," *Eng. Struct.*, vol. 83, pp. 243–251, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.10.017.
- [14] M. Z. Naser, R. A. Hawileh, and J. A. Abdalla, "Modeling Strategies of Finite Element Simulation of Reinforced

- Concrete Beams Strengthened with FRP: A Review,” *J. Compos. Sci.*, vol. 5, no. 1, p. 19, 2021.
- [15] M. A. H. Hassanen and M. Raoof, “Design against premature peeling failure of RC beams with externally bonded steel or FRP plates,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 53, no. 4, pp. 251–262, Aug. 2001, doi: 10.1680/macr.2001.53.4.251.
- [16] R. de Borst, “Integration of plasticity equations for singular yield functions,” *Comput. Struct.*, vol. 26, no. 5, pp. 823–829, Jan. 1987, doi: 10.1016/0045-7949(87)90032-0.
- [17] A. C. 318, “318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary,” p. 520, 2014.