

Investigation of the behavior of reinforced concrete deep beams under the corrosion of longitudinal reinforcements

Maryam Taghizadeh¹, Mansour Ghalehnovi^{2*}

1- Master student of Civil Engineering, Ferdowsi University, Mashhad

2- professorship, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University, Mashhad

ABSTRACT

Reinforced concrete members form the main structure of a structure. The risk of corrosion of rebar is considered as an effective factor in determining the life of these structures, so identifying and investigating its destructive factors is very important, especially corrosion of longitudinal rebar; Because the weakness of concrete in tensile increases the possibility of cracking of tensile concrete and the formation of a bed to start the corrosion process in longitudinal rebar. The beginning of the corrosion process leads to a decrease in the cross-sectional area of the rebar and an increase in the corrosion products; This increase in volume due to the products causes tension around the rebar, which ultimately creates cracks in the concrete, reduces the adhesion between the concrete and the rebar, exfoliates the concrete surface and reduces the compressive strength of the concrete. Due to the fact that the adverse effects of rebar corrosion have been less studied in deep reinforced concrete beams, in this study, the corrosion effect of longitudinal rebar by applying elements such as: reduced cross section, reduced rebar yield strength, reduced concrete compressive strength, reduced adhesion The connection between concrete and rebar in ABAQUS finite element software on the stiffness and strength of deep reinforced concrete beams has been investigated. The results show that with the increasing percentage of corrosion of longitudinal rebar, the strength and stiffness of deep beams are significantly reduced so that when the longitudinal rebar reach 50% corrosion, it loses 51.38% of its strength and A reduction of 43.57% is difficult. Beam behavior has also changed from shear to bending due to corrosion and the stress-strain diagram shows the decrease in stress and strain with increasing corrosion percentage.

ARTICLE INFO

Receive Date: 31 March 2021

Revise Date: 14 September 2021

Accept Date: 24 October 2021

Keywords: Reinforced concrete deep beam
Armature corrosion
Finite element method
Reinforcement slip in concrete
Reduce armature cross section

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.277354.2383

*Corresponding author: Mansour Ghalehnovi
Email address: ghalehnovi@um.ac.ir

بررسی سختی و مقاومت تیر عمیق بتن مسلح دارای خوردگی تحت بار استاتیک

مریم تقی‌زاده^۱، منصور قلعه‌نوی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

چکیده

اعضای بتن مسلح ساختار اصلی یک سازه را تشکیل می‌دهند. خطر خوردگی میلگرد به عنوان یک عامل تأثیرگذار در تعیین عمر این سازه‌ها به شمار می‌رود بنابراین شناخت و بررسی عوامل مخرب آن از اهمیت زیادی برخوردار است به ویژه خوردگی میلگردهای طولی؛ زیرا ضعف بتن در کشش، احتمال ایجاد ترک خوردگی بتن کششی و شکل‌گیری بستری برای شروع فرآیند خوردگی را در میلگردهای طولی افزایش می‌دهد. آغاز فرآیند خوردگی منجر به کاهش سطح مقطع میلگرد و افزایش فرآورده‌های خوردگی می‌شود؛ این افزایش حجم ناشی از فرآورده‌ها، باعث اعمال تنشی به اطراف میلگردها می‌شود که در نهایت ایجاد ترک در بتن، کاهش چسبندگی بین بتن و میلگرد، لایه لایه شدن سطح بتن و کاهش مقاومت فشاری بتن را به همراه دارد. با توجه به اینکه اثرات نامطلوب پدیده‌ی خوردگی میلگرد، کمتر در تیرهای عمیق بتن مسلح مورد مطالعه قرار گرفته است، در این پژوهش اثر خوردگی میلگردهای طولی با اعمال عناصری همچون: کاهش سطح مقطع، کاهش مقاومت تسلیم میلگرد، کاهش مقاومت فشاری بتن، کاهش چسبندگی و پیوستگی بین بتن و میلگرد در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS بر سختی و مقاومت تیرهای عمیق بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که با روند افزایشی درصد خوردگی میلگردهای طولی، مقاومت و سختی تیرهای عمیق، به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد طوری که در هنگام رسیدن میلگردهای طولی به خوردگی ۵۰٪، ۵۱/۳۸ درصد از مقاومت خود را از دست می‌دهد و کاهش ۴۳/۵۷ درصدی سختی را به همراه دارد. رفتار تیر نیز در اثر اعمال خوردگی، از برشی به خمشی تغییر یافته است و نمودار تنش - کرنش، کاهش تنش و کرنش را با افزایش درصد خوردگی نشان می‌دهد.

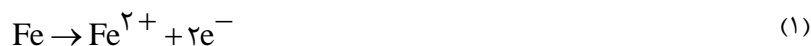
کلمات کلیدی: تیر عمیق بتن مسلح، خوردگی میلگرد، اجزاء محدود، کاهش چسبندگی و پیوستگی بین بتن و میلگرد، کاهش سطح مقطع میلگرد، ترک خوردگی بتن

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.277354.2383	۱۴۰۱/۰۲/۳۱	۱۴۰۰/۸/۰۲	۱۴۰۰/۸/۰۲	۱۴۰۰/۶/۲۳	۱۴۰۰/۰۱/۱۱
10.22065/JSCE.2021.277354.2383	منصور قلعه‌نوی ghalehnovi@um.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

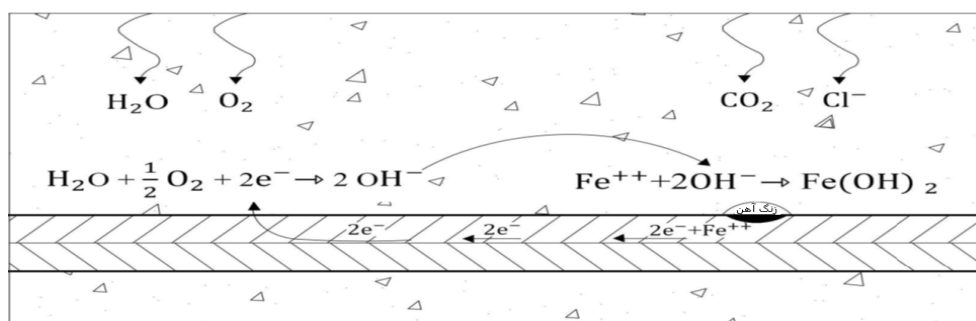
۱- مقدمه

در سازه‌های بتن مسلح، تیرها به عنوان یک عضو مهم و پرکاربرد شناخته می‌شوند. آن‌ها بسته به احتیاج سازه در دو نوع تیر بتن مسلح معمولی و تیر عمیق بتن مسلح، مورد استفاده قرار می‌گیرند. تفاوت اساسی این دو نوع تیر در هندسه و رفتار آن‌ها است؛ تیرهای عمیق برخلاف تیرهای معمولی دارای ارتفاع بیشتر می‌باشند به همین دلیل آن‌ها را براساس نسبت دهانه به عمق تیر که به نسبت دهانه‌ی برشی موسوم است، می‌سنجند. این نسبت را در آیین‌نامه‌هایی از جمله، در اروپا کمتر از ۲/۵، در آمریکا چهار و در کانادا پنج تعریف کرده‌اند [۱]. تیرهای عمیق دارای رفتار متفاوت و پیچیده‌تری از تیرهای معمولی هستند؛ در آن‌ها برش نقش مهمی را در ایجاد ترک‌ها و نوع شکست ایفا می‌کند اما در تیرهای بتن مسلح معمولی رفتار خمشی حاکم است.

از خوردگی فولاد می‌توان به عنوان یک نوع واکنش الکتروشیمیایی یاد کرد؛ در واقع به علت اختلاف پتانسیلی که بین دو الکتروود فلزی به نام آند و کاتد در داخل محلول الکتروولیت وجود دارد، فرآیند اکسیداسیون صورت می‌پذیرد. در بتن نیز محیط قلیایی حاصل از PH، باعث ایجاد یک لایه محافظتی از لایه‌ی غیرفعال در سطح فولاد می‌شود که این لایه از میلگرد در برابر خوردگی محافظت می‌کند [۲]. برای تشکیل فرآیند خوردگی سه عامل آهن، آب و اکسیژن یا کربن، مورد نیاز است. با فرآهم شدن این عوامل، لایه‌ی غیرفعال میلگردها از بین می‌رود و اتم آهن دو الکترون و یک یون Fe^{2+} آزاد می‌کند که واکنش آن به صورت رابطه‌ی (۱) است.



قسمت از بین رفته‌ی لایه‌ی غیرفعال که همان ناحیه‌ی آندی است، با آب و اکسیژن موجود در بتن واکنش داده و محصول حاصل از این واکنش در ناحیه‌ی آندی به سمت ناحیه‌ی کاتد که همان یون‌های Fe^{2+} تولید شده در آند است، حرکت می‌کنند [۲]؛ این روند طی چند مرحله صورت می‌گیرد و هیدروکسید آهن $(Fe(OH)_2)$ یا همان زنگ آهن را به وجود می‌آورد در ادامه به این دو واکنش، تحت روابط (۲) و (۳) اشاره می‌شود. فرآیند خوردگی در شکل (۱) آمده است. از آنجایی که این محصول هم، در مقابل اکسیژن و رطوبت موجود پایدار نیست به همین جهت با آن‌ها واکنش داده و محصول نهایی که همان اکسید آهن هیدراته است را به وجود می‌آورد [۲]. این محصولات در رنگ‌های سیاه، قهوه‌ای، سبز و به ترتیب با نام‌های (Fe_2O_4) ، $(Fe_2O_3.H_2O)$ ، $(Fe_3O_4.H_2O)$ شناخته می‌شوند [۲].



شکل ۱: فرآیند خوردگی آرماتور در بتن [۲]

خوردگی میلگرد در اعضاء بتن آرمه اثرات نامطلوبی در رفتار سازه می‌گذارد و یک عنصر مهم در تعیین عمر سازه به شمار می‌رود [۳]. با آغاز فرآیند خوردگی، سطح مقطع میلگرد کاهش یافته و سبب افزایش فرآورده‌های ناشی از خوردگی می‌شود. این افزایش حجم، تنشی به بتن اطراف میلگردها اعمال می‌کند که باعث ایجاد ترک در بتن، کاهش چسبندگی بین بتن و میلگرد، ورقه ورقه شدن سطح بتن و در نهایت کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود. خوردگی در دو نوع به فولاد سرایت می‌کند: ۱- خوردگی کلی (سراسری) که در اثر کربنات‌شدن رخ می‌دهد [۴]؛ روند این نوع خوردگی با ترک از داخل به بیرون بتن شروع شده به طوری که ترک‌ها را در امتداد میلگرد روی

سطح بتن می‌توان مشاهده کرد و در نهایت منجر به لایه لایه شدن و شکست بتن می‌شود [۵]. ۲- خوردگی نقطه‌ای (حفره‌ای) که ناشی از واکنش با کلرایدها صورت می‌پذیرد [۴]؛ این نوع خوردگی که در طول فولاد به صورت موضعی صورت می‌گیرد، در درصد بالایی از خوردگی، علائم خارجی را نشان می‌دهد [۵]. به همین دلیل برخلاف خوردگی سراسری، فقط تردشدگی و کاهش سطح مقطع در این نوع خوردگی قابل مشاهده است. در ادامه به برخی از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه اشاره می‌شود.

عظیم‌زاده عوامل مؤثر در میزان ایجاد آسیب‌های ناشی از خوردگی را، در درصدهای مختلف برای تیر و ستون بتن آرمه بررسی کرده است. به همین جهت به بررسی ایستایی غیرخطی ۵۰ تیر و ستون بتن مسلح توسط نرم‌افزار ABAQUS پرداخته و پس از تعیین حداکثر ظرفیت و میزان سختی در زمان ترک کامل در ناحیه کششی، تغییرات نسبی آن‌ها را برای درصدهای خوردگی ۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ محاسبه کرد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که مقاومت و سختی تیر و ستون با اعمال همه‌ی اثرات ناشی از خوردگی، کاهش می‌یابند. در تیرها با افزایش خوردگی، مقاومت و سختی تدریجاً کاهش یافته و در ستون‌ها اثرات خوردگی، تقریباً مشابه تیرها می‌باشد با این تفاوت که به علت وجود نیروی محوری زیاد، اثر کمتری در لغزش میلگرد اعمال می‌شود. کاهش سطح مقطع میلگرد، اصل مهم در کاهش مقاومت اعضاء بتن مسلح است [۶].

میت او همکاران عملکرد غیرخطی تیرهای بتن مسلح تحت خوردگی را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور دو تیر بتن مسلح دارای تکیه‌گاه مفصلی و غلتکی تحت دو بار استاتیکی متمرکز توسط نرم‌افزار ABAQUS الگوسازی و تحلیل شدند؛ دو تیر متقارن بوده، بنابراین نیمی از آن‌ها بررسی شده است. تیر تحت خوردگی میلگردهای طولی در درصدهای ۰، ۳/۸۰٪، ۷/۸۰٪ و ۲۵/۳۰٪ قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، میزان کاهش ظرفیت نهایی با افزایش خوردگی شدت می‌یابد. سلامت ساختاری تیر بتن مسلح، شکل‌پذیری و جابجایی تیر نیز، بعد از رسیدن سطح خوردگی به حدودا ۱۲٪، به شدت کاهش می‌یابد [۷].

ویوآو همکاران عملکرد مکانیکی تیرهای عمیق بتن مسلح آسیب دیده در اثر خوردگی در یک محیط کلراید را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در آزمایش، چهار تیر عمیق در مقیاس بزرگ ساخته شده است؛ بعد از اعمال بار، میزان لغزش میلگردهای طولی در بتن و افت مقطع در میلگردهای طولی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد، توزیع خوردگی در میلگردهای طولی به طور یکنواخت صورت نگرفته است. همبستگی میان بخش‌های دارای افت سطح مقطع با عرض ترک ناشی از خوردگی، ضعیف می‌باشد و خوردگی بر روی میلگردهای کششی روند تخریب را از شکست برشی به خمش تغییر داده است [۸].

مانجوناس^۳ و همکاران تیرهای عمیق دارای بتن خود متراکم را تحت خوردگی مورد ارزیابی قرار دادند. بدین منظور تیرهای عمیق ساخته شده با بتن خود متراکم در سه درصد خوردگی ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ تحت بارگذاری استاتیکی متمرکز یک نقطه‌ای در وسط دهانه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاکی از کاهش مقاومت نهایی در خوردگی ۵٪ است؛ این در حالی است که مقاومت خمشی نهایی در ۱۰٪ خوردگی به دلیل عملکرد قوس در تیر، افزایش می‌یابد. در این نمونه‌ها گسیختگی در اثر شکست برشی و تخریب بتن رخ داده است [۹].

سان - جین‌هان^۴ و همکاران به بررسی اثرات خوردگی میلگرد طولی بر ظرفیت برشی تیر بتن مسلح با میلگرد عرضی پرداخته‌اند. بدین منظور هشت نمونه را تحت درصدهای مختلف خوردگی در دو دسته که یک گروه در انتهای میلگردهای طولی بدون قلاب است و گروه دیگر دارای قلاب ۹۰ درجه می‌باشد با بارگذاری یک نقطه‌ای، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد در نمونه‌ی بدون قلاب عملکرد میلگردها در درصد خوردگی‌های کمتر از دو درصد، به دلیل تبدیل انتقال بار از عمل تیر به عمل قوس، بهبود می‌یابد و در نمونه‌ی دارای قلاب ظرفیت برشی در درصدهای بالا و پایین خوردگی، افزایش می‌یابد [۱۰].

آزام^۵ و سودکی^۶ به بررسی اثر خوردگی میلگردهای طولی بر رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح با برش بحرانی به صورت تجربی پرداخته‌اند. بدین این منظور، هشت نمونه با مقیاس متوسط ساخته شد که از آن‌ها شش تیر در معرض خوردگی مصنوعی با درصدهای ۵ و

1 Meet

2 Yu

3 Manjunath

4 Sun-Jin Han

5 Azam

6 Soudki

۷/۵ قرار گرفتند و دو تیر دیگر برای جلوگیری از خوردگی تحت بازبینی بودند. در این آزمایش تیرها به دو گروه تقسیم شدند، هر گروه شامل یک تیر بدون خوردگی و دو تیر تحت اثر خوردگی و یک تیر دارای خوردگی و ترمیم شده با CFRP^۷ به صورت U شکل، می‌باشند. تیرها دارای تکیه‌گاه ساده بوده و تحت بارگذاری یک نقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که خوردگی میلگردهای طولی، هیچ تأثیر منفی بر رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح بحرانی ندارد. خوردگی، روند انتقال بار را به یک عمل قوس خالص تغییر داده و منجر به بهبود ظرفیت باربری شده است. ترمیم FRP^۸ برای تیرهای تحت اثر خوردگی، در جلوگیری از شکست برشی مؤثر نبوده است [۱۱].

۲- ضرورت انجام تحقیق

اکثر تحقیقات انجام شده بر روی تیرهای عمیق بتن مسلح، بررسی رفتار برشی آن‌ها بوده است؛ در زمینه خوردگی نیز، بیشتر تحقیقات در تیرهای بتن مسلح معمولی و به صورت آزمایشگاهی صورت گرفته و در راستای بررسی خوردگی در تیر عمیق، تحقیقات بسیار کمی انجام شده که اکثراً هم به صورت آزمایشگاهی بودند. در این پژوهش سعی شده تا با بررسی میزان تأثیرگذاری خوردگی میلگردهای طولی بر سختی و مقاومت تیر عمیق بتن مسلح به روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS در جهت شناخت بهتر این پدیده بر روی تیرهای عمیق، گامی برداشته شود؛ به همین جهت از دو پژوهش برگرفته از ادبیات تحقیق، شامل: کار آزمایشگاهی توسط اکبرزاده‌ی بنگر و همکاران [۱۲] و سان - جین‌هان و همکاران [۱۰] جهت صحت‌سنجی و الگوسازی استفاده شده است.

۳- اثر خوردگی بر رفتار مصالح

جهت اعمال رفتار خوردگی میلگرد در نرم‌افزار، چهار عنصر اصلی شامل: کاهش سطح مقطع میلگرد، کاهش مقاومت تسلیم میلگرد، کاهش مقاومت فشاری بتن و کاهش چسبندگی و پیوستگی بین بتن و میلگرد توسط روابطی که ارائه شده، محاسبه گشته است. همچنین برای اعمال رفتار بتن و فولاد در نرم‌افزار نیز، روابط و توضیحاتی ارائه شده است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۱- اثرات ناشی از خوردگی بر سطح مقطع میلگردها

خوردگی در هر دو نوع حفره‌ای و یکنواخت، باعث کاهش سطح مقطع می‌شود که از رابطه‌ی (۴) می‌توان آن را محاسبه کرد.

$$A_s^R = \frac{\pi(D_0 - \lambda X)^2}{4} \quad (4)$$

در این رابطه، A_s^R : باقی‌مانده‌ی سطح مقطع میلگرد، D_0 : قطر اولیه‌ی میلگرد، X : میزان عمق نفوذ خوردگی در میلگرد را در نظر می‌گیرد و λ : اثر خوردگی میلگرد در حالتی که در یک یا دو جهت صورت گرفته، اعمال می‌کند که در این پژوهش با فرض اعمال اثر خوردگی در دو جهت، مقدار آن برابر دو می‌باشد [۳].

۳-۲- اثر خوردگی بر مقاومت تسلیم میلگرد

خوردگی اولیه میلگرد، کاهش تدریجی را هم در مقاومت تسلیم و هم در روند افزایش یکنواخت طول فولاد به همراه دارد به همین دلیل در درصد خوردگی‌های بالا این روند کاهشی رفتار فولاد را تُرد کرده به طوری که منجر به گسیختگی ناگهانی فولاد و در نهایت خرابی سازه می‌شود. بر این مبنا رابطه‌ی (۵) میزان مقاومت تسلیم باقی‌مانده از میلگرد خورده شده را محاسبه می‌کند.

$$f_y^R = (1 - 0.005 m_{loss}) f_y^0 \quad (5)$$

⁷ Carbon Fiber Reinforced Polymer

⁸ Fiber Reinforced Polymer

در این رابطه، f_y^r : مقاومت تسلیم در میلگرد تحت خوردگی، f_y^0 : مقاومت تسلیم میلگرد و m_{loss} : درصد کاهش جرم فولاد را که از رابطه‌ی (۶) بدست می‌آید، می‌باشد.

$$m_{loss} = \frac{M_{loss}}{M} \times 100 \quad (۶)$$

در این رابطه نیز، M_{loss} : جرم فولاد خورده شده بر واحد طول و M_0 : جرم اولیه فولاد بر واحد طول است [۶].

۳-۳- رابطه‌ی بین کاهش سطح مقطع با شروع ترک خوردگی

از مقایسه سطح مقطع کاهش یافته در مقابل میزان کاهش سطح مقطع فولاد با شروع خوردگی، ترک خوردن بتن ناشی از خوردگی میلگرد را می‌توان بررسی نمود. رابطه‌ی (۷) میزان کاهش سطح مقطع با شروع ترک خوردگی را بدست می‌دهد.

$$\Delta A_s = A_s \left[1 - \left[1 - \frac{\alpha}{\phi} \left(\gamma / \delta^3 + \eta / \zeta^2 \frac{C}{\phi} \right) \times 10^{-3} \right]^2 \right] \quad (۷)$$

در این رابطه ΔA_s (میلی متر مربع): سطح مقطع کاهش یافته فولاد، A_s (میلی متر مربع): سطح مقطع اولیه، α (میلی متر): ضریب تمرکز خوردگی است که در خوردگی یکنواخت، برابر با دو و در حالت حفره‌ای بین چهار تا هشت می‌باشد. ϕ (میلی متر): قطر آرماتور و C (میلی متر): ارتفاع روکش بتن است [۵].

۳-۴- اثرات ناشی از خوردگی بر مقاومت فشاری بتن

مقاومت فشاری بتن، با ایجاد ترک‌های کوچک و بزرگ در بتن که حاصل از اعمال تنش‌های داخلی بین بتن و میلگرد در اثر فرآورده‌های خوردگی است، کاهش می‌یابد [۱۳]؛ لذا کاهش مقاومت فشاری بتن، به میانگین میزان کرنش کششی عرضی بستگی دارد که منجر به ترک‌های طولی ریز می‌شود [۶]؛ بنابراین می‌توان با استفاده از مدل وِکچو^۹ و کولینگ^{۱۰} [۱۴]، مقاومت کاهش یافته را از رابطه‌ی (۸) محاسبه نمود.

$$f_c^* = \frac{f_c}{1 + \frac{K \varepsilon_1}{\varepsilon_c}} \quad (۸)$$

در این رابطه، K : ضریب مربوط به سختی و قطر فولاد است؛ لازم به ذکر است، برای آرماتورهای رایج، K پیشنهادی توسط محققان، ۰/۱ می‌باشد [۱۵]. ε_c : کرنش در مقابل تنش فشاری حداکثر و ε_1 : کرنش کششی متوسط در بتن ترک خورده است که از رابطه‌ی (۹) می‌توان محاسبه کرد.

$$\varepsilon_1 = \frac{b_f - b_0}{b} \quad (۹)$$

که در این رابطه نیز، b_0 : عرض مقطع در حالت بدون ترک حاصل از خوردگی است و b_f : عرض مقطع افزایش یافته در اثر خوردگی است [۱۴]. عبارت $(b_f - b_0)$ را می‌توان براساس رابطه‌ی (۱۰) به طور تقریبی محاسبه کرد [۱۶].

⁹ Vecchio

¹ Colling

$$b_f - b_c = n_{bars} \times w_{cr} \quad (10)$$

که در این رابطه n_{bars} : تعداد میلگردهای فشاری، w_{cr} : عرض کل ترک در خوردگی با عمق نفوذ X که با استفاده از رابطه (۱۱) ارائه شده توسط مولینا و همکاران [۱۶] محاسبه می‌شود؛ لازم به ذکر است این رابطه با فرض اینکه همه‌ی فرآورده‌های خوردگی حول میلگرد جمع شده‌اند به طوری که قابل فشرده شدن نیستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد پس w_{cr} به اندازه‌ی افزایش محیط اطراف میلگرد می‌باشد [۱۷].

$$w_{cr} = \sum u_{icorr} = \nu_{rs} (v_{rs} - 1) X \quad (11)$$

در این رابطه نیز ν_{rs} : انبساط حجمی اکسیدها نسبت به مصالح اولیه و برابر با دو می‌باشد، X : عمق نفوذ خوردگی و u_{icorr} : میزان بازشدن هر ترک در اثر خوردگی است. در واقع قطر میلگرد به اندازه‌ی $2X$ افزایش دارد [۱۷].

۳-۵- محاسبه عمق نفوذ خوردگی با استفاده از روابط تجربی

در مناطق دارای خوردگی، جرم باقی‌مانده‌ی میلگرد در واحد طول تعیین شده و با جرم اولیه مقایسه می‌شود. بنابراین می‌توان متوسط جرم کاهش یافته‌ی میلگرد را در اثر خوردگی با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) محاسبه نمود [۱۸].

$$\Delta m = m - m' \quad (12)$$

در این رابطه: جرم اولیه و: جرم باقی‌مانده در واحد طول می‌باشد. با تعیین میزان جرم کاهش یافته میلگرد در اثر خوردگی می‌توان کاهش سطح مقطع را از رابطه‌ی (۱۳) بدست آورد [۱۸].

$$\Delta A_s = \frac{\Delta m}{m} \times A_s \quad (13)$$

که در این رابطه، (میلی متر مربع): سطح مقطع اولیه میلگرد می‌باشد.

با استفاده از رابطه‌ی (۱۴)، ارتباط بین میزان عمق نفوذ خوردگی و کاهش سطح مقطع بیان می‌شود [۱۸].

$$\varphi = \varphi_0 - \alpha X \quad (14)$$

در این رابطه، φ : قطر باقی‌مانده میلگرد، φ_0 (میلی متر): قطر اولیه، X : عمق خوردگی و α : ضریب تمرکز خوردگی است که در خوردگی یکنواخت، برابر با دو و در حالت حفره‌ای بین چهار تا هشت می‌باشد.

در نهایت، براساس روابط (۱۲) تا (۱۴) عمق نفوذ خوردگی را برحسب (میکرومتر)، می‌توان از رابطه‌ی (۱۵) بدست آورد [۱۸].

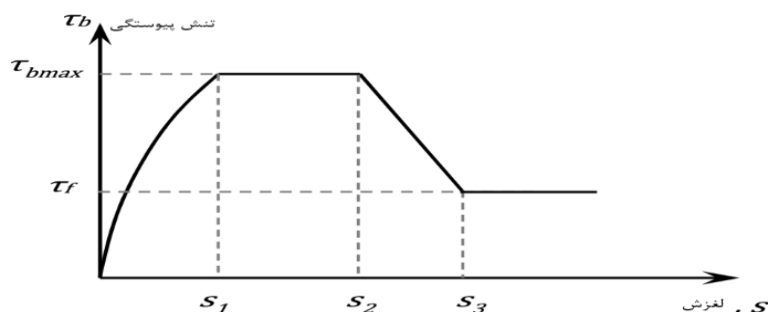
$$X = \frac{\varphi_0}{\alpha} \left[1 - \sqrt{\frac{\Delta A_s}{A_s}} \right] \times 10^3 \quad (15)$$

۳-۶- اثر خوردگی بر چسبندگی و پیوستگی بین بتن و فولاد تحت خوردگی

مقاومت برشی ایجاد شده بین سطح میلگرد و بتن که منجر به انتقال نیرو میان فولاد و بتن می‌شود، همان مقاومت چسبندگی و پیوستگی می‌باشد که به میزان چسبندگی بین آن‌ها و گیرایی میان آج‌های میلگرد به بتن وابسته است. پدیده‌ی خوردگی میلگردها، کاهش

چسبندگی و پیوستگی بین فولاد و بتن را به همراه دارد. با شروع فرآیند این پدیده، فرآورده‌های حاصل از اکسیداسیون، به بافت متخلخل بتن نفوذ می‌کند و منجر به ایجاد اصطکاک بین میلگرد و بتن شده و افزایش مقاومت پیوستگی را به بار می‌آورد. این رویداد تا حدود چهار درصد خوردگی در فولاد، رخ می‌دهد؛ بعد از آن به خاطر افزایش بیش از حد این فرآورده‌ها، نیروی شعاعی از طرف فولاد به بتن اعمال شده که باعث بروز ترک‌های ریزی در اطراف میلگرد می‌شود. با بروز این ترک‌ها، فشار تماسی شعاعی و در نتیجه، اصطکاک بین فولاد و بتن کاهش یافته و در نهایت مقاومت پیوستگی را کاهش می‌دهد. ایجاد محصورشدگی توسط خاموت‌ها، راهکاری برای جبران کاهش پیوستگی در اثر خوردگی به شمار می‌رود، خاموت‌ها با ایجاد محصورشدگی کافی، تنش عمودی بین فولاد و بتن را افزایش داده و منجر به افزایش اصطکاک میان آن دو می‌شود. لازم به ذکر است جبران کاهش پیوستگی با استفاده از محصورشدگی کافی، برای خوردگی‌های چهار درصد به بالا مطرح می‌شود [۱۹]. در ادامه تغییرات تنش پیوستگی با لغزش میلگرد در بتن محصورشده، بیان می‌گردد.

اگر جسمی توسط نیروی کششی (T) کشیده شود، نیروی اصطکاک (F_f)، مانع از حرکت جسم بر روی سطح می‌شود. تا زمانی که نیروی T از حداکثر نیروی اصطکاک (F_{fMax}) کمتر باشد ($T < F_{fMax}$)، هیچ لغزشی بین جسم و سطح رخ نمی‌دهد. با تعمیم این مثال به رابطه‌ی بین میلگرد و بتن، مشخص می‌شود از همان ابتدای بارگذاری هیچ لغزشی میان میلگرد و بتن رخ نمی‌دهد تا زمانی که تنش میلگرد به حداکثر مقدار خود برسد. شکل (۳) نمودار تنش پیوستگی - لغزش را نشان می‌دهد [۱۹]. در این نمودار زمانی که تنش به ۴۰ درصد از حداکثر مقدار خود (τ_f) برسد، به دلیل نفوذ آج‌های میلگرد به داخل بتن، ترک‌های ریز موضعی ایجاد می‌شود؛ این روند تا رسیدن تنش به حداکثر مقدار (τ_{bmax}) ادامه می‌یابد [۱۹]. بعد از آن به علت اعمال شدن شرایط محصورشدگی کافی در بازه‌ای مشخص، تنش ثابت می‌ماند که نشان‌دهنده‌ی گسستگی در بتن بوده و تخریب با بیرون زدن میلگرد از بتن صورت می‌گیرد [۱۹]. اگر محصورشدگی کافی نباشد، شیب ثابت در قسمت قبل، روند نزولی پیدا کرده و تنش پیوستگی به مقدار τ_f تقلیل می‌یابد و تخریب در اثر تکه تکه شدن بتن رخ می‌دهد [۱۹]. استاندارد اروپا CEB-FIB رابطه‌ی تنش پیوستگی - لغزش برای میلگرد سالم را در قالب ضابطه‌ی (۱۶) ارائه کرده است [۲۰]. از آنجایی که در این ضابطه، خوردگی میلگرد لحاظ نشده به همین دلیل جهت اصلاح رابطه، با فرض یکنواخت بودن خوردگی میلگرد در طول تیر از روابط (۱۷) تا (۲۱) استفاده می‌شود [۲۱].



شکل ۳: رفتار تنش پیوستگی در برابر لغزش [۱۹]

$$\tau_b : \begin{cases} \tau_{b \max} \left(\frac{s}{s_1} \right)^\alpha & 0 \leq s \leq s_1 \\ \tau_{b \max} & s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau_{b \max} - \frac{\tau_{b \max} - \tau_f}{s_3 - s_2} (s - s_2) & s_2 \leq s \leq s_3 \\ \tau_f & s_3 \leq s \leq s_4 \end{cases} \quad (16)$$

در این رابطه، τ_b : تنش پیوستگی، $\tau_{b_{max}}$: حداکثر تنش پیوستگی است که به دلیل وابسته بودن به میزان محصورشدگی بین مقادیر f_c تا $0.125f_c$ تا $0.45f_c$ متغیر می‌باشد. τ_f : حداقل مقدار ثابت که برابر با ۴۰ درصد از $\tau_{b_{max}}$ می‌باشد، α : عدد ثابت دو، S : میزان لغزش، S_1 و S_2 : اعداد ثابت به ترتیب برابر با یک و سه است، S_3 : فاصله بین آج‌های میلگرد که در اینجا براساس استاندارد آلمان برابر با 0.3 است، S_4 : سه برابر S_3 می‌باشد.

$$\frac{\tau_b^r}{\tau_{b_{max}}^r} = \begin{cases} 1 + \left(1 + K_1\right) \frac{X}{X_{cr}} & X \leq X_{cr} \\ \max \left[K_1 - K_2 \left(X - X_{cr} \right), 0.15 \right] & X \geq X_{cr} \end{cases} \quad (17)$$

در این رابطه $\frac{\tau_{b_{max}}^r}{\tau_{b_{max}}}$: تنش پیوستگی نرمال حاصل از نسبت تنش پیوستگی تحت اثر خوردگی به تنش پیوستگی اولیه می‌باشد، X_{cr} : میزان خوردگی که منجر به ترک خوردن بتن می‌شود، K_1 : افزایش اولیه تنش پیوستگی بعد از شروع خوردگی است، K_2 : نرخ خرابی تنش پیوستگی بعد از تشکیل ترک‌ها است که به میزان محصورشدگی ایجاد شده توسط پوشش بتن و خاموت‌ها بستگی دارد. لازم به ذکر است رابطه‌ی (۱۷) که بیشترین مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد را بعد از خوردگی بدست می‌دهد، به علت در نظر گرفتن عناصر بیشتر شامل: پوشش بتن، قطر میلگرد، محصورشدگی، مقاومت کششی بتن، افزایش مقاومت پیوستگی اولیه و میزان ترک خوردن و یا نخوردن بتن، دقیق‌تر است [۵].

$$X_{cr} = a_1 + a_2 \left(\frac{C}{d} \right) + a_3 f_{ct} \quad (18)$$

در این رابطه a_1 ، a_2 ، a_3 به ترتیب با مقدار ثابت تقریبی $0.74/4$ ، $0.7/3$ و $1.17/4$ - تعریف می‌شوند، C : پوشش بتن، d : قطر میلگرد و f_{ct} : مقاومت کششی بتن می‌باشند.

$$K_1 : \begin{cases} 1 & \frac{C}{d} \leq 1 \\ 1 + 0.085 \left(\frac{C}{d} - 1 \right) & \frac{C}{d} > 1 \end{cases} \quad (19)$$

$$K_2 : \begin{cases} 0.005 & \rho \leq 0.25 \\ 0.005 - \frac{\rho - 0.25}{3.0} & 0.25 < \rho \leq 1 \\ 0.0025 & \rho > 1 \end{cases} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)، ρ : میزان محصورشدگی بتن می‌باشد و با استفاده از رابطه‌ی (۲۱) بدست می‌آید.

$$\rho = \frac{\sum A_{st}}{\sum A_s} \quad (21)$$

این رابطه حاصل از نسبت مجموع سطح مقطع میلگردهای عرضی به مجموع سطح مقطع میلگردهای طولی محصور شونده می‌باشد.

۳-۷- بتن

رفتار بتن تحت تنش فشاری تک محوری غیرخطی است به همین جهت در هنگام بارگذاری، ترک‌های ریزی در میان ملات سیمان با دانه‌ها که از اتصال ضعیفی برخوردار هستند، گسترش می‌یابد. این ترک‌ها تا زمانی که تنش اعمالی کمتر از ۳۰ درصد مقاومت فشاری بتن باشد، گسترش پیدا نکرده و تقریباً ثابت می‌ماند بنابراین رفتار بتن را در این ناحیه می‌توان، کشسان خطی دانست. اما با افزایش تنش اعمالی به ۸۰ درصد مقاومت فشاری بتن، ترک‌ها بزرگ شده و گسترش نیز می‌یابند که منجر به کاهش سختی و در آخر ایجاد رفتار غیرخطی بتن می‌شود؛ با افزایش تنش، بیشتر از حد مذکور، ترک‌ها در داخل ملات رشد و گسترش پیدا می‌کند که منجر به انبساط حجمی و افزایش ضریب پواسون می‌شود. در نهایت با رسیدن تنش اعمالی به بیش از تنش حداکثر (f'_c)، ترک‌های بزرگ شده در محل تماس ملات با دانه‌ها، به هم متصل شده و باعث ایجاد سطوح خرابی به طور ناپیوسته در بتن می‌گردد. جهت الگوسازی در نرم‌افزار از الگوی آسیب خمیری (CDP)^{۱۲} که به لحاظ رفتاری، مشابهت زیادی به رفتار واقعی بتن دارد، استفاده می‌شود. ضریب پواسون بتن در تمام الگوهای این پژوهش برابر با ۰/۲ می‌باشد. برای تعریف رفتار تک محوری فشاری بتن، از الگوی هانگستاد استفاده شده است. روابط (۲۳) تا (۲۹) رفتار فشاری بتن را بدست می‌دهد [۲۲]. عناصر خسارت پلاستیک بتن در قالب جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: عناصر خسارت پلاستیک بتن

ویسکوزیتی	K	f_{b0}/f_{c0}	خروج از مرکزیت	زاویه اتساع
۰/۰۰۱	۰/۸۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۰

$$f'_c = k_s \times f'_c \quad \begin{cases} f'_c = 15 \rightarrow k_s = 1 \\ f'_c = 20 \rightarrow k_s = 0.97 \\ f'_c = 25 \rightarrow k_s = 0.95 \\ f'_c = 30 \rightarrow k_s = 0.93 \\ f'_c \geq 35 \rightarrow k_s = 0.92 \end{cases} \quad (23)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (24)$$

$$\varepsilon_c = 1.8 \frac{f'_c}{E_c} \rightarrow 0.0015 < \varepsilon_c < 0.003 \text{ \& } \varepsilon_{cu} \geq 0.003 \quad (25)$$

$$\sigma_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_c} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c} \right)^2 \right] \quad (26)$$

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \sigma_c E_c^{-1} \quad (27)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (28)$$

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E} \quad (29)$$

که در این روابط f_c' : حداکثر تنش در عضو بتن، f_c' : مقاومت فشاری بتن، ε_c : کرنش نظیر تنش حداکثر و ε_{cu} : کرنش نهایی و d_c : خسارت فشاری می‌باشد.

جهت تعریف رفتار کششی بتن از رابطه‌ی (۳۰) استفاده می‌شود [۲۳] و روابط (۲۷) تا (۲۹) نیز با عناصر کششی در محاسبات رفتار کششی بکار می‌روند.

$$\sigma_t = 0.3 \sigma_c \quad (30)$$

۳-۸- فولاد

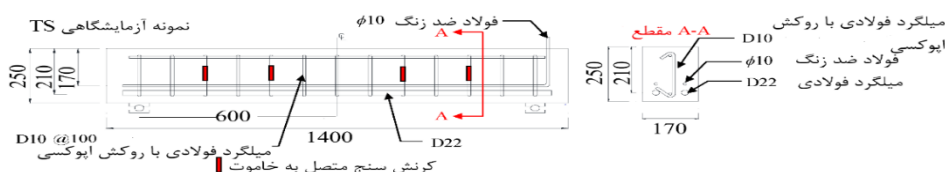
به دلیل کاهش زمان تحلیل و جلوگیری از مشکلات عدم همگرایی، برای الگوسازی رفتار غیرخطی فولاد، از روش سخت‌شوندگی دوخطی استفاده شده است که در پاسخ نهایی تأثیر خاصی نمی‌گذارد. با این روش، رفتار کششی و فشاری فولاد یکسان فرض شده و فولاد تا رسیدن به تنش تسلیم، خطی باقی می‌ماند و در این نقطه تحت بار ثابت، جاری می‌شود. در این پژوهش، مدول ارتجاعی و ضریب پواسون به ترتیب ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود.

۴- صحت‌سنجی الگوسازی

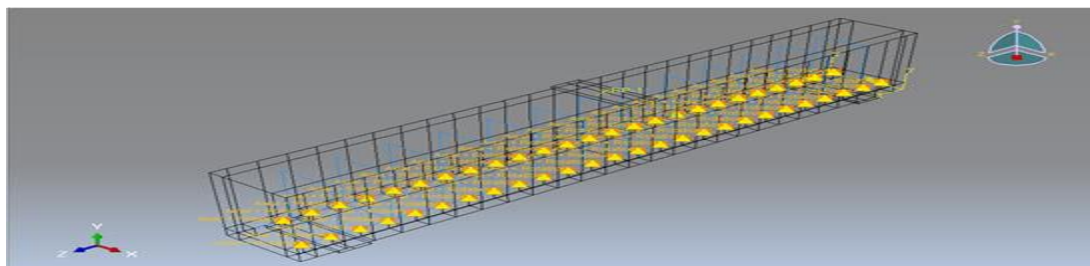
برای انجام پژوهش مورد نظر نیاز به الگویی مبنا جهت دریافت اعتبار برای نتایج حاصل از تحقیق می‌باشد. بدین منظور از دو آزمایش سان - جین‌هان و همکاران [۱۰] که به بررسی اثرات خوردگی میلگرد طولی بر ظرفیت برشی اعضاء بتن مسلح با میلگرد عرضی پرداخته‌اند و آزمایش اکبرزاده‌ی بنگر و همکاران [۱۲] که رفتار شش تیر عمیق بتن مسلح تقویت شده در برش با ورق‌های CFRP، به دو روش نصب بیرونی EB و نصب در نزدیک سطح NSM را مورد بررسی قرار داده‌اند، جهت صحت‌سنجی استفاده شده است.

۴-۱- آزمایش اول: سان - جین‌هان و همکاران

یک تیر بتن مسلح معمولی به ابعاد ۱۷۰×۲۵۰×۱۴۰۰ میلی‌متر، دارای دو میلگرد طولی $\Phi 22$ بدون قلاب و خاموت‌های $\Phi 10 @ 100$ ، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تیر پوشش بتنی جانبی و عمودی تا آرماتور کششی برابر با ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. خاموت‌ها توسط اپوکسی از ابتدا به خوردگی درامان بوده و میلگردهای طولی دچار خوردگی ۱۵ درصدی شده‌اند. تکیه‌گاه‌های تیر ساده (مفصلی) با دهانه‌ی ۱۲۰۰ میلی‌متری می‌باشد و تیر تحت اعمال شرایط بارگذاری استاتیکی متمرکز به ارزش ۱۶۸/۱ کیلونیوتن قرار دارد. اشکال (۴) و (۵) مشخصات نمونه و الگوی نرم‌افزاری را نشان می‌دهد. صفحات فولادی در مناطق تکیه‌گاهی و بارگذاری به ابعاد ۶۰×۱۷۰×۱۰ میلی‌متر جهت جلوگیری از تمرکز تنش و لهیدگی استفاده شده است. مشخصات مصالح بکار رفته، در قالب جدول (۲) ارائه شده است [۱۰].



شکل ۴ اجزاء تیر آزمایش اول جهت صحت‌سنجی [۱۰]



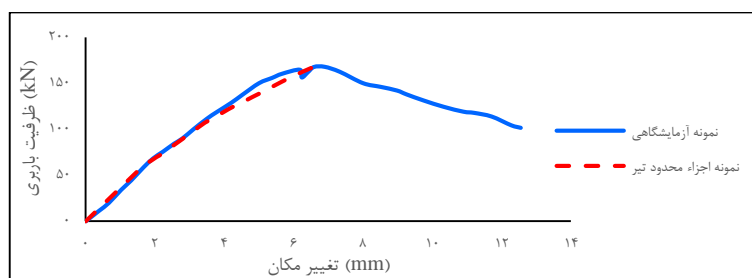
شکل ۵: الگوی تیر آزمایش اول در نرم افزار جهت صحت سنجی

جدول ۲: مشخصات فولاد و بتن آزمایش اول

نمونه	آرماتور تحت خوردگی	درصد خوردگی	مقاومت فشاری بتن (f_c)	آرماتور فشاری	آرماتور طولی	آرماتور برشی (mm)	تنش تسلیم آرماتور طولی (f_y MPa)	تنش تسلیم آرماتور برشی (f_y MPa)
Ts-۱۵	L	۱۵/۰٪	۵۶/۳	-	۲φ۲۲	φ۱۰@۱۰۰ (mm)	۶۳۵	۵۳۴

۴-۱-۱- نتیجه صحت سنجی در آزمایش اول

به جهت تأیید اعتبار الگوی آزمایشی، نمونه‌ی آزمایشگاهی توسط نرم افزار ABAQUS، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۶) نمودار صحت سنجی در این آزمایش را نشان می‌دهد؛ میزان خطا براساس حداکثر ظرفیت باربری، ۰/۰۱٪ می‌باشد.



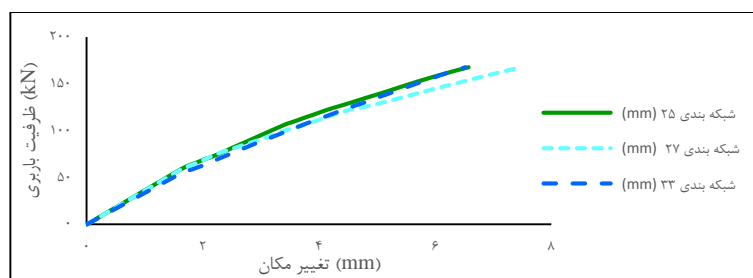
شکل ۶: نمودار صحت سنجی نمونه‌ی آزمایش اول

۴-۱-۲- اندازه تقسیم بندی اجزاء آزمایش اول در نرم افزار

در این پژوهش جهت جلوگیری از واگرایی نتایج کاوش، نیاز به استفاده از تقسیم بندی کوچک در اجزاء می‌باشد؛ بدین منظور مشخصات تقسیم بندی براساس جدول (۳) صورت گرفته است. این در حالی است که با سایر تقسیم بندی‌ها مانند ۲۷ و ۳۳ میلی‌متر در آزمایش اول، نتیجه با خطای ناچیز، ثابت می‌ماند. شکل (۷) حاکی از این موضوع می‌باشد.

جدول ۳: مشخصات شبکه بندی نمونه‌ی صحت سنجی در آزمایش اول

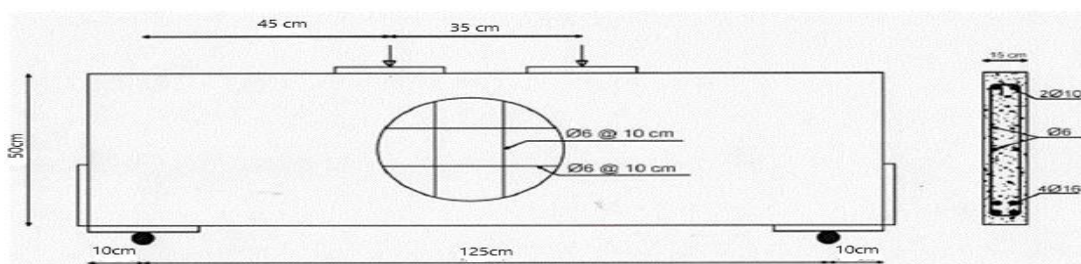
آزمایش اول			
ابعاد شبکه بندی	روش شبکه بندی	جزء انتخابی	اجزاء
۲۵	Standard – Hex	Solid → C۳D۸R	بتن
۱۰	Standard – Hex	Solid → C۳D۸R	صفحات بارگذاری
۳۰ → میلگرد طولی	Standard – Line	Wire → Beam۳۱	میلگرد
۱۰ → خاموت طولی			



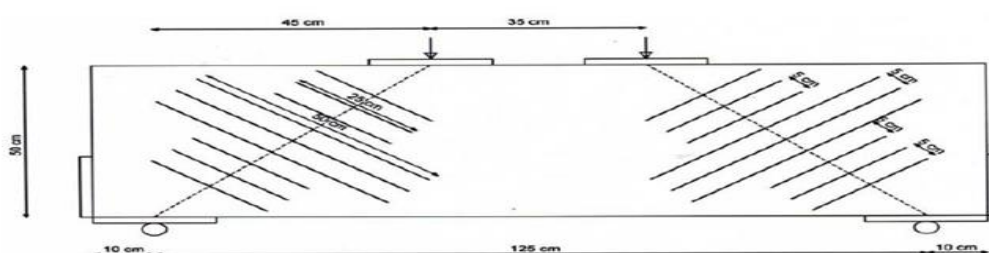
شکل ۷: نمودار همگرایی نتایج با شبکه بندی مختلف در آزمایش اول

۲-۴- آزمایش دوم: اکبرزاده‌ی بنگر و همکاران

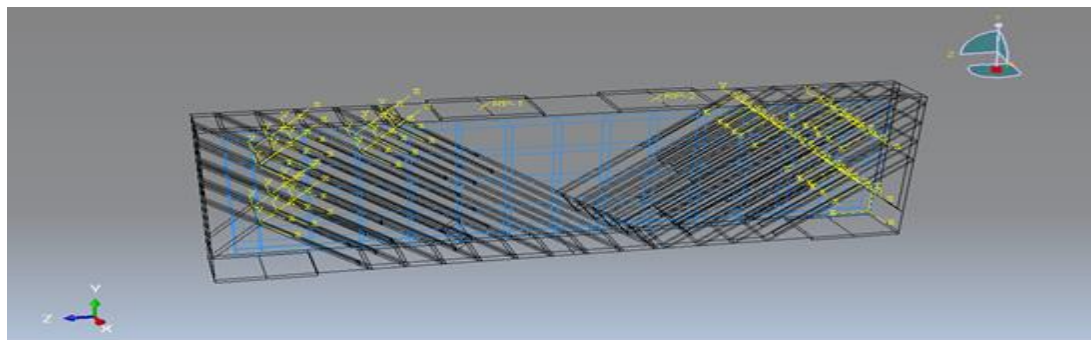
یک تیر عمیق بتن مسلح به ابعاد $1450 \times 150 \times 500$ میلی‌متر دارای چهار میلگرد طولی Φ_{16} در دو سفره و دو آرماتور فشاری Φ_{10} و خاموت‌های عرضی و طولی $\Phi_{6@100}$ انتخاب شده است. پوشش بتنی برابر با ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. صفحه‌ای فولادی به ابعاد $10 \times 200 \times 150$ میلی‌متر در محل اعمال بار و تکیه‌گاه‌ها قرار گرفته است. برای جلوگیری از لغزش میلگردها بجای قلاب از مهار مکانیکی استفاده شده اما در الگوسازی اندرکنش بین بتن و میلگردها با چسبندگی کامل اعمال می‌شود پس نیازی به الگوسازی آن‌ها نیست. تکیه‌گاه‌ها ساده (مفصلی) است و بارگذاری استاتیکی توسط دو نیروی متمرکز به ظرفیت ۱۰۰ تن به صورت یکنواخت اعمال شده است. جهت تقویت تیر از ورق‌های CFRP به طول ۵۰ و ۲۵ سانتی‌متر به روش NSM استفاده شده است به طوری که در تیر عرض شیارها ۵ میلی‌متر و عمق آن‌ها ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. اشکال (۸) و (۹) و (۱۰) مشخصات نمونه و الگوی نرم‌افزاری تیر مورد نظر را نشان می‌دهند. جداول (۴) تا (۶) مشخصات مصالح این آزمایش را نشان می‌دهند [۱۲].



شکل ۸: اجزاء تیر آزمایش دوم جهت صحت‌سنجی [۱۲]



شکل ۹: تقویت تیر آزمایش دوم به روش NSM [۱۲]



شکل ۱۰: الگوی تیر آزمایش دوم در نرم افزار جهت صحت سنجی

جدول ۴: مشخصات فولاد و بتن آزمایش دوم

نمونه	مقاومت فشاری مکعبی بتن (MPa) (f_{cu})	تنش تسلیم (MPa) (f_y)	آرماتور طولی و عرضی برشی (cm)	آرماتور فشاری	آرماتور کششی
A-N	۴۸/۳۷	۴۰۰	$\phi_{ع} @ ۱۰$ (cm)	$۲\phi_{۱۰}$	$۴\phi_{۱۶}$

در آزمایش دوم Sika Carbo Dur ۵۱۲ مدل CFRP جدول ۵: مشخصات

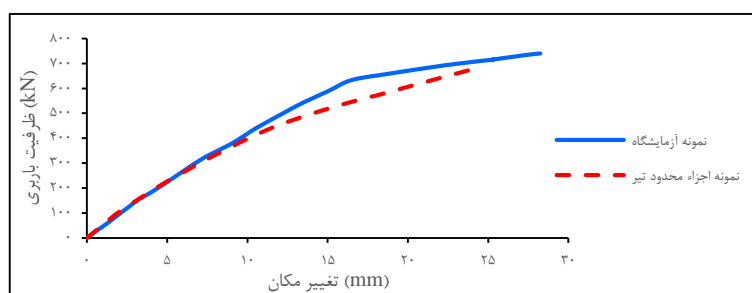
نمونه	کرنش نهایی (ϵ_{FH}) (%)	مدول الاستیسیته (GPa) (E_{FH})	تنش کششی نهایی (MPa) (f_{FH})	ضخامت (cm)	چگالی (kg/cm^3)	عمق شیار (cm)	عرض شیار (cm)	عرض (cm)	طول (cm)
A-N	۱/۷	۱۶۵	۲۸۰۰	۰/۱۲	۱/۶	۲/۵	۰/۵	۱/۶۵	۳ عدد $\rightarrow ۵۰$ (cm) ۶ عدد $\rightarrow ۲۵$ (cm)

جدول ۶: مشخصات اپوکسی محصول Sika در آزمایش دوم

مقاومت برشی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	چگالی (kg/cm^3)
>۱۵	۱۲/۸	>۲۵	>۹۰	۱/۷۷

۴-۲-۱- نتیجه صحت سنجی در آزمایش دوم

شکل (۱۱) نمودار صحت سنجی در این آزمایش را در قالب نمودار نیرو - جابجایی نشان می دهد. در این آزمایش میزان خطا بر مبنای حداکثر ظرفیت باربری، ۸/۸۷٪ می باشد.



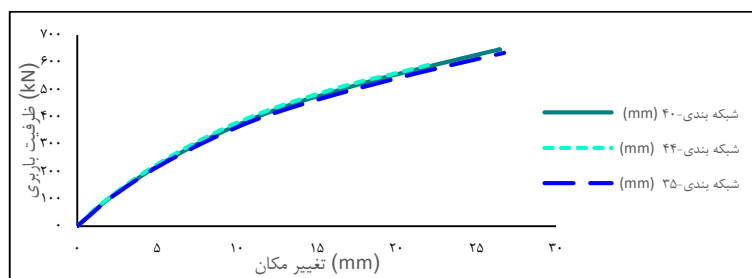
شکل ۱۱: نمودار صحت سنجی نمونه‌ی آزمایش دوم

۴-۲-۲- اندازه تقسیم بندی اجزاء آزمایش دوم در نرم افزار

مشخصات تقسیم بندی در این آزمایش، براساس جدول (۷) صورت گرفته است. این در حالی است که با سایر تقسیم بندی ها مانند ۳۵ و ۴۴ میلی متر در آزمایش دوم، نتیجه با خطای ناچیز، ثابت می ماند. شکل (۱۲) این موضوع را نشان می دهد.

جدول ۷: مشخصات شبکه بندی نمونه‌ی صحت‌سنجی در آزمایش دوم

آزمایش دوم			
ابعاد شبکه بندی	روش شبکه بندی	جزء انتخابی	اجزاء
۴۰	Standard – Hex	Solid → C ³ D ¹ R	بتن
۱۰	Standard – Hex	Solid → C ³ D ¹ R	صفحات بارگذاری
۳۰ → میلگرد طولی	Standard – Line	Wire → Beam ³ 1	میلگرد
۳۰ → میلگرد فشاری			
۱۰ → خاموت طولی			
۳۰ → خاموت عرضی			
۱۰	Standard – Quad	Shell → S ⁴ R	FRP



شکل ۱۲: نمودار همگرایی نتایج با شبکه بندی مختلف در آزمایش دوم

۴-۳- الگوی عددی

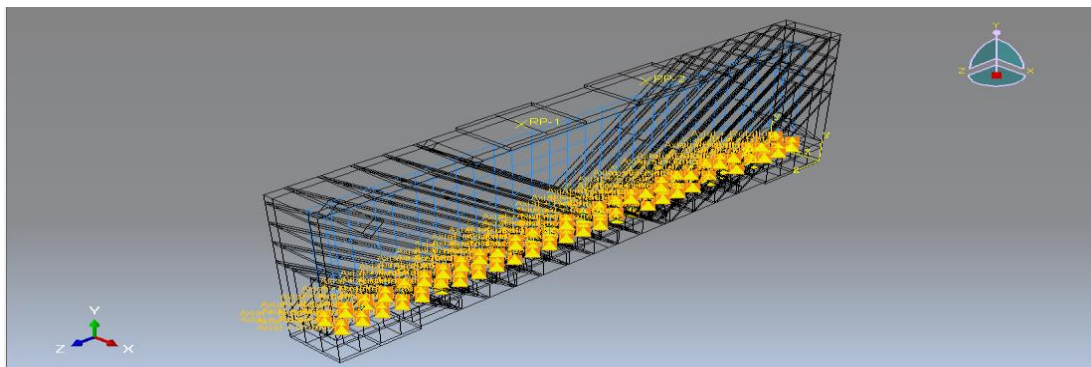
برای انجام پژوهش مورد نظر از الگوی صحت‌سنجی شده در آزمایش دوم و بدون FRP، استفاده می‌گردد که مشخصات آن در جدول (۸) قرار دارد. اطلاعات مربوط به عناصر خوردگی برای میلگردهای طولی در این پژوهش براساس روابط ذکر شده در بخش سوم، محاسبه و در جدول (۹) ارائه شده است. شکل (۱۳) الگوی پژوهشی را با خوردگی میلگرد نشان می‌دهد.

جدول ۸: مشخصات الگوی عددی

ابعاد صفحات بارگذاری (mm)	تکیه گاه	پوشش بتنی (mm)	f_c (Mpa)	تنش تسلیم - f_y (Mpa)	خاموت طولی و عرضی (mm)	میلگرد فشاری (mm)	میلگرد کششی (mm)	ابعاد (mm)
۱۵۰×۲۰۰×۱۰	مفصلی	۵۰	۴۸/۳۷	۴۰۰	$\phi_8 @ 10^{(cm)}$	۲ ϕ_{10}	۴ ϕ_{16}	۱۵۰×۵۰×۱۴۵۰

جدول ۹: مشخصات بتن و فولاد الگوی دارای خوردگی آرماتور طولی

نمونه	تنش برشی حداکثر (τ_{rbmax}) (Mpa)	مقاومت فشاری روکش بتن (f_c^*) (Mpa)	مقاومت فشاری بتن (f_c') (Mpa)	تنش تسلیم فولاد (f_y') (Mpa)	مانده فولاد (A_s^r) (mm) ²	عمق نفوذ خوردگی (X) (mm)	درصد خوردگی (%)
تبر پروژه	۲۰/۰۳	-	۴۸/۳۷	-	-	-	۰
	۱۸/۶۰	۳۸/۰۸	۴۸/۳۷	۳۹۰/۰۰	۱۹۱/۰۱	۰/۲۰	۵
	۱۵/۲۶	۳۱/۲۶	۴۸/۳۷	۳۸۰/۰۰	۱۸۰/۹۶	۰/۴۱	۱۰
	۱۲/۸۷	۲۶/۴۰	۴۸/۳۷	۳۷۰/۰۰	۱۷۰/۹۰	۰/۶۲	۱۵
	۸/۵۸	۱۷/۶۴	۴۸/۳۷	۳۴۰/۰۰	۱۴۰/۷۴	۱/۳۱	۳۰
	۵/۶۸	۱۱/۷۳	۴۸/۳۷	۳۰۰/۰۰	۱۰۰/۵۳	۲/۳۴	۵۰



شکل ۱۳: نمونه‌ی عددی دارای خوردگی آرماتورهای طولی

۴-۵- جزءهای انتخابی در نرم‌افزار

تیر بتنی و صفحات بارگذاری جزءای از نوع توپر (Solid) دارای هشت گره و با انگرال کاهش‌یافته (C3D8R) است. الگوسازی آرماتورهای فولادی نیز از جزء سه بعدی و نوع سیمی (Wire) دارای دو گره و سه درجه آزادی در هر گره (Beam B31) استفاده شده و برای اندرکنش بین بتن و میلگرد تحت خوردگی، از اتصال‌دهنده‌ها استفاده شده است. الگوسازی ورق FRP از جزء صفحه (Shell) با چهار گره و شش درجه آزادی (S4R) در نظر گرفته شده است.

۴-۶- تقسیم‌بندی اجزاء در نرم‌افزار

در این پژوهش اندازه‌ی شبکه‌بندی تمامی الگوهای عددی، ۴۰ می‌باشد. در تمامی نمونه‌ها جزء بتن و صفحات بارگذاری از روش Standard - Hex و برای میلگردها از Standard - Line استفاده شده است. برای FRP مورد استفاده در آزمایش صحت‌سنجی دوم نیز از روش Standard - Quad بهره گرفته شده است.

۴-۷- شرایط مرزی

۴-۷-۱- اندرکنش میلگرد طولی دارای خوردگی با بتن

خوردگی میلگرد، چسبندگی و پیوستگی بین میلگرد و بتن را کاهش می‌دهد و منجر به لغزش در بین آن دو می‌شود. برای اعمال لغزش، می‌توان از اتصال‌دهنده‌ها^۳ که نوعی جزء فنر مانند هستند و در شبیه‌سازی رفتار انتقال نیرو بین دو گره (در اینجا یک گره از بتن و یک گره از میلگرد) کاربرد دارند، استفاده کرد. از آنجایی که هدف از بکارگیری این جزء، ایجاد جابجایی نسبی بین بتن و میلگرد به صورت کنترل شده می‌باشد، این اتصال‌دهنده‌ها باید در راستای طول میلگرد قرار گرفته و سایر درجات آزادی آن از بتن متصل شده به میلگرد تبعیت کنند. هرچه تعداد این اتصال‌دهنده‌ها زیاد باشد، اندرکنش بهتر انتقال می‌یابد و در صورتی که تعداد آن‌ها کافی نباشد، نرم‌افزار نمی‌تواند انتقال نیرو را درست اعمال کند و هنگام پردازش، خطای عدم همگرایی را اعلام می‌کند. رفتار این اتصال‌دهنده‌ها در قالب نمودار نیرو - جابجایی نسبی براساس ضابطه‌ی (۱۶) و رابطه‌ی (۲۲) اعمال می‌شود به طوری که تنش‌ها از منحنی تنش پیوستگی - لغزش شکل (۳) که حاصل از ضابطه‌ی (۱۶) می‌باشد، در سطح جانبی یک میلگرد ضرب شده و بر تعداد اتصال‌دهنده‌های موجود بین یک میلگرد با بتن تقسیم می‌شود [۶].

$$F_{\text{connector}} = \frac{\tau_b \times A}{n_{\text{connector}}} = \frac{\tau_b \pi d l}{n} \quad (22)$$

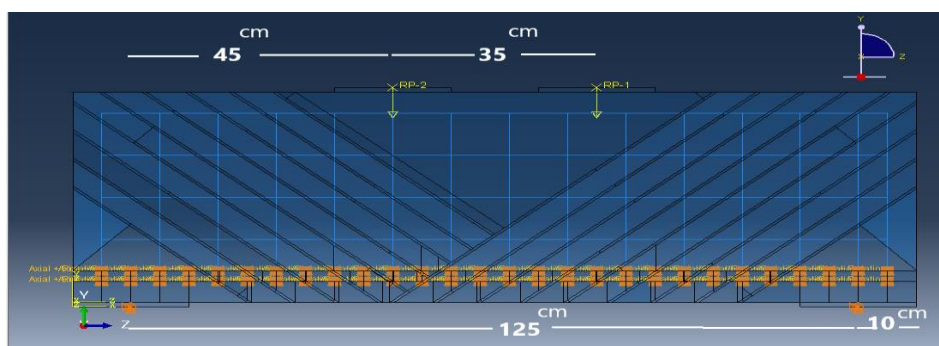
که در این رابطه F : نیرو، τ_b : تنش برشی حاصل از نمودار، A : سطح جانبی یک میلگرد، d : قطر آرماتور و l : طول آرماتور می‌باشد.

۴-۷-۲- خاموت‌ها و میلگردهای فشاری و صفحات بارگذاری

در تمامی نمونه‌ها اندرکنش میان خاموت‌ها و میلگردهای فشاری با بتن توسط عنصر مدفون کردن (Embedded Region) صورت گرفته است. همچنین در آزمایش صحت‌سنجی دوم نیز که میلگردهای طولی دارای خوردگی نیستند، از این عنصر استفاده شده است. در این نوع قید تمام درجات آزاد بخش مدفون شده به درجات آزادی بخش مورد نظر مقید می‌شود. برای اندرکنش صفحات بارگذاری و FRP مورد استفاده در آزمایش صحت‌سنجی دوم با بتن نیز، از قید گره (Tie) استفاده شده است.

۴-۸- بارگذاری

از آنجایی که با اعمال درصدهای مختلف خوردگی در میلگرد، مقاومت تسلیم آن نیز تغییر می‌یابد بنابراین عناصر مربوط به رفتار کشسان و آسیب فولاد در دسترس نمی‌باشد. در این حالت اگر تنش موجود در فولادها از تنش نهایی بیشتر شود، مقدار آن کم نشده و میلگردها از باربری نیز برکنار نمی‌روند. با توجه به اینکه نرم‌افزار نمی‌تواند لحظه‌ی گسیختگی را تشخیص دهد، مبنای پایان تحلیل در همه‌ی نمونه‌های مورد بررسی، براساس آزمایش دوم صحت‌سنجی که در آن تیر عمیق در جابجایی حدوداً ۲۸/۴۶ میلی‌متر و در اثر خرد شدن بتن فشاری گسیخته می‌شود، مقدار ۲۸/۴۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ضمن اینکه در این پژوهش هدف دستیابی به حداکثر ظرفیت باربری است و بخش افت نمودار مدّ نظر نبوده است لذا بارگذاری به صورت استاتیکی متمرکز دو نقطه‌ای در قالب شکل (۱۴) و در نرم‌افزار به طور نیرو - کنترل، اعمال می‌شود. با توجه به اینکه در تیرهای با تکیه‌گاه ساده، بیشترین جابجایی در وسط دهانه رخ می‌دهد و برای بررسی نمونه‌ها نیاز به نمودار بار - جابجایی می‌باشد، در همه‌ی تیرهای مورد بررسی، وسط تیرها برای اندازه‌گیری جابجایی انتخاب شده است.

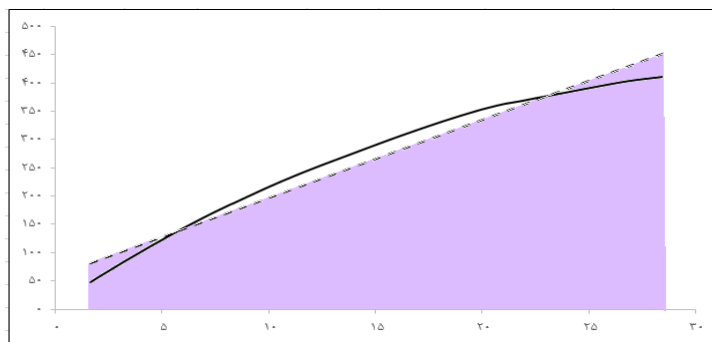


شکل ۱۴: محل اعمال بار در الگوی عددی

۵- نتایج

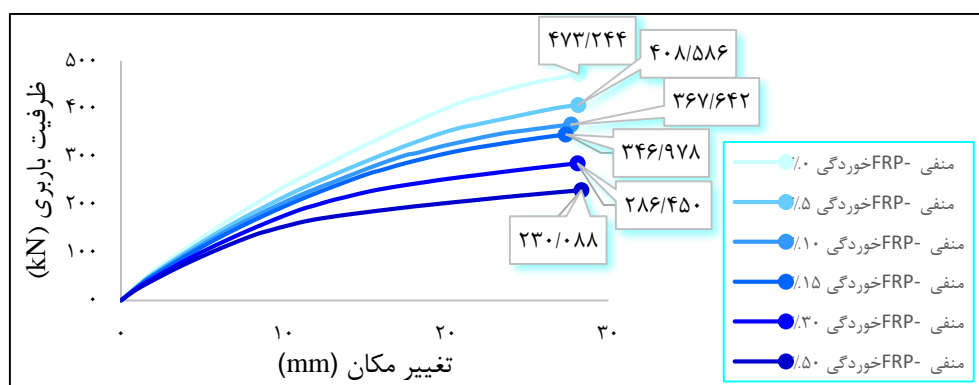
تغییرات میزان باربری نهایی، با تجزیه‌ی الگوها و بدست آوردن حداکثر ظرفیت باربری از نمودار بار - جابجایی، در قالب نمودارهای میله‌ای ارائه می‌شود. از آنجایی که سختی یک جزء، میزان مقاومت آن جزء را در برابر تغییر شکل بدست می‌دهد بنابراین یکای سختی برابر با واحد نیرو بر واحد جابجایی است پس سختی را می‌توان از شیب نمودار بار - جابجایی محاسبه نمود. قابل توجه است، چون سختی مماسی محاسبه می‌شود و از روش اجزاء محدود برای بدست آوردن نمودار نیرو - جابجایی استفاده شده است، هر دو سختی خمشی و برشی حضور دارند و قابل تفکیک نمی‌باشند. با توجه به این که در این پژوهش اثرگذاری خوردگی بر میلگردهای طولی مورد بحث است، بنابراین باید سختی ناحیه‌ای بررسی شود که میلگرد طولی نقش اصلی را ایفا می‌کند و بتن کاربرد زیادی ندارد به همین جهت برای محاسبه‌ی سختی، سطح زیر نمودار بار- جابجایی را بعد از ناحیه‌ی خطی که توان کششی مقطع توسط میلگردهای طولی تأمین

می‌شود و اثر لغزش بین میلگرد و بتن به خوبی قابل مشاهده است، بدست می‌آید؛ بدین منظور خطی روی منحنی رسم می‌شود که مساحت زیر آن خط تقریباً با مساحت زیر منحنی یکسان می‌باشد. سختی الگوها نیز به صورت نمودارهای میله‌ای برای الگوهای مختلف ارائه می‌شود. شکل (۱۵) نمونه‌ای از محاسبه سختی با بدست آوردن سطح زیر نمودار معادل منحنی را در این پژوهش نشان می‌دهد. لازم به ذکر است به دلیل نبودن مشخصات دقیق میلگردهای تحت خوردگی و عدم روابط مورد نیاز برای تخمین رفتار کششی و فشاری فولاد خورده شده برای اعمال در نرم‌افزار، بررسی اثرگذاری میزان خوردگی بر شکل پذیری امکان پذیر نمی‌باشد.

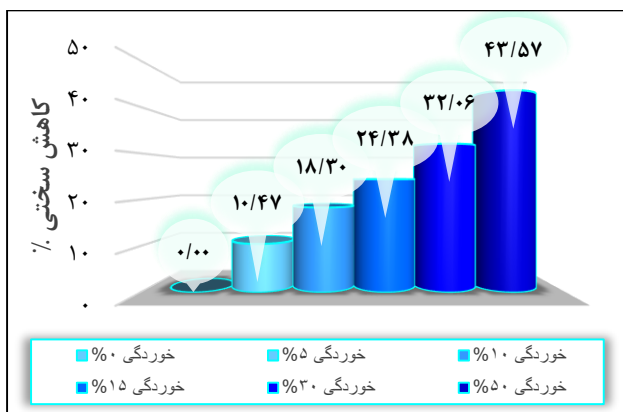


شکل ۱۵: مساحت زیر نمودار معادل منحنی برای محاسبه سختی

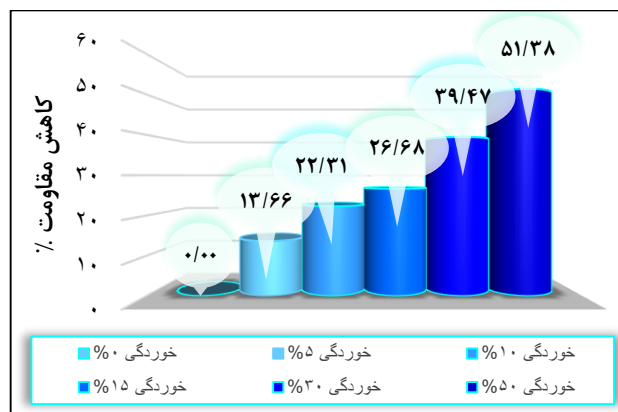
شکل (۱۶) نمودار بار - جابجایی را برای تمامی نمونه‌ها در درصد خوردگی‌های مختلف نشان می‌دهد؛ در این شکل حداکثر ظرفیت باربری نیز مشخص شده است. انتظار می‌رود اعمال خوردگی منجر به کاهش ظرفیت باربری شود. شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نیز به ترتیب کاهش مقاومت و کاهش سختی را در درصد خوردگی‌های مختلف بیان می‌کند.



شکل ۱۶: نمودار نیرو - جابجایی تیر عمیق تحت اثر خوردگی میلگرد طولی در درصد‌های مختلف

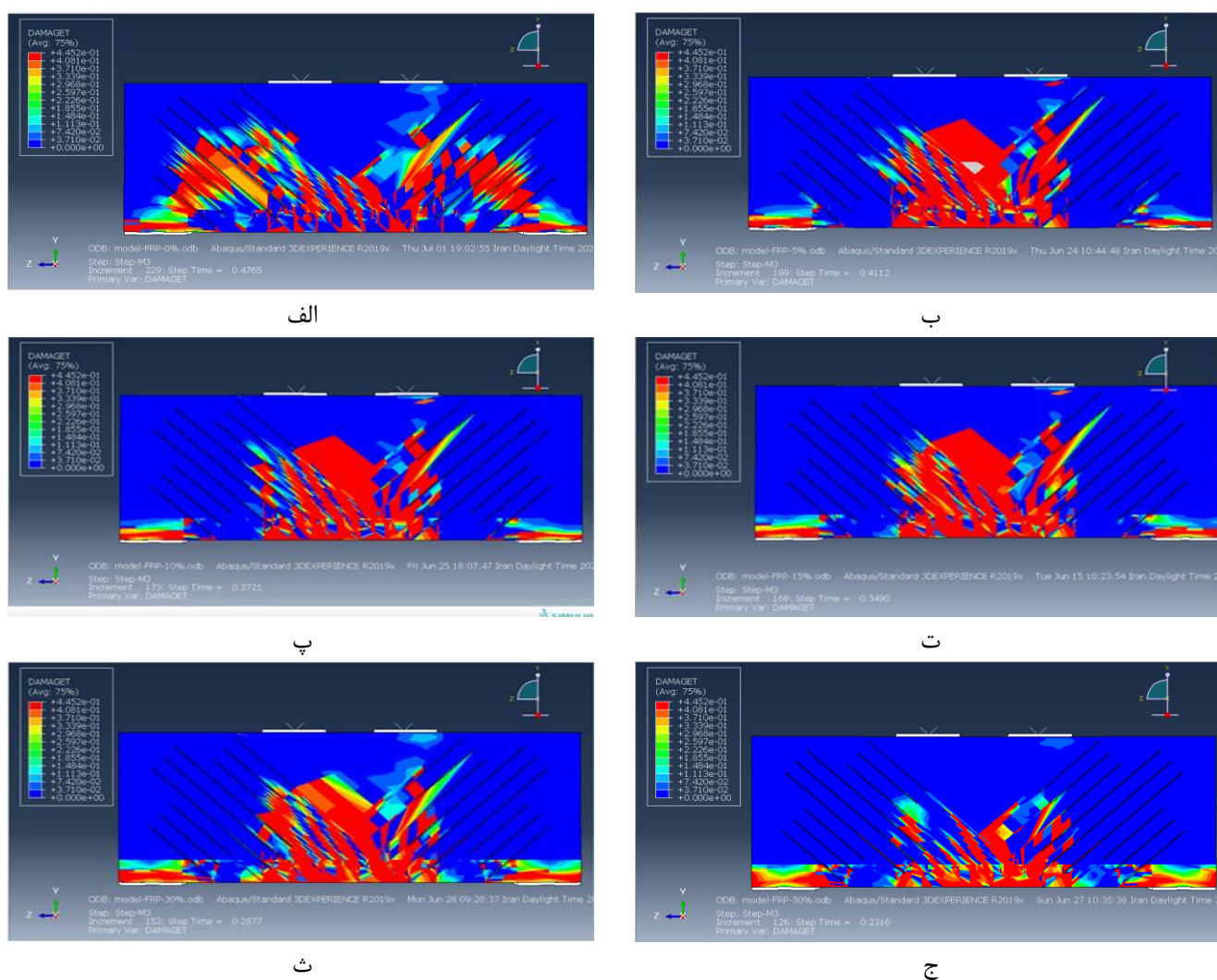


شکل ۱۸: نمودار درصد کاهش سختی تیر عمیق تحت خوردگی میلگرد طولی

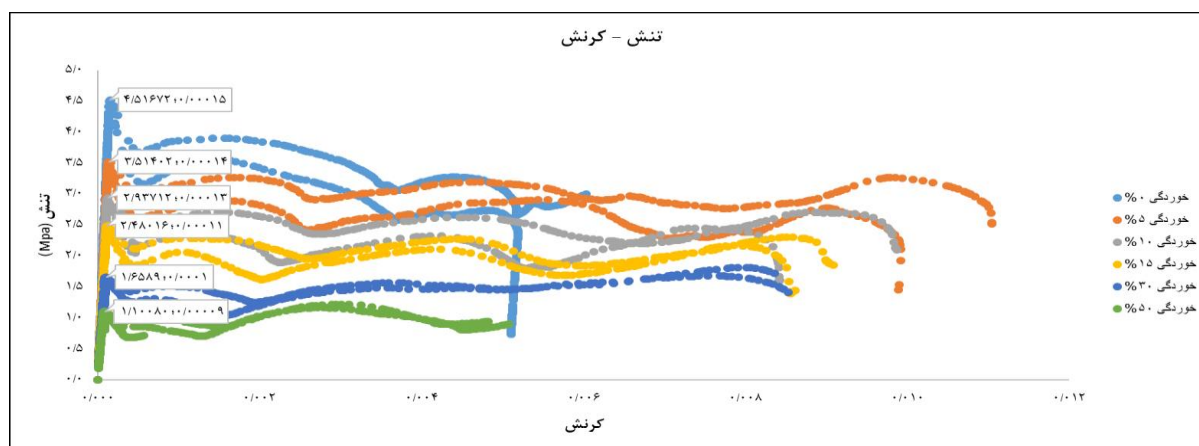


شکل ۱۷: نمودار درصد کاهش مقاومت تیر عمیق تحت خوردگی میلگرد طولی

شکل‌های (۱۹)، نحوه‌ی آسیب خمیری در کشش را برای درصدهای مختلف خوردگی نشان می‌دهند. نمودارهای تنش - کرنش نمونه در یک نقطه از وسط دهانه و در درصدهای مختلف مقایسه شده و در قالب شکل (۲۰) ارائه شده است. نحوه‌ی آسیب خمیری در کشش نشان می‌دهد، با اینکه در تیر عمیق رفتار برشی حاکم است، اما به خاطر اعمال خوردگی در میلگردهای طولی و ضعف بتن در کشش، رفتار برشی به خمشی تغییر یافته است؛ شکل (الف) که تیر عمیق بدون خوردگی است، رفتار برشی را نشان می‌دهد، در حالی که در شکل‌های (ب)، (پ)، (ت)، (ث) و (ج) که میلگردهای طولی آن‌ها دچار خوردگی شدند، رفتار خمشی را بیان می‌کند. نمودارهای تنش - کرنش نیز نشان‌دهنده‌ی روند کاهشی در تنش و کرنش تیر عمیق، با افزایش درصد خوردگی هستند؛ زیرا با افزایش درصد خوردگی، کارایی میلگردهای طولی به شدت کاهش یافته و با توجه به ضعف بتن در کشش، تیر عمیق در این ناحیه، بسیار آسیب‌پذیر می‌شود؛ در ۵۰٪ خوردگی، به دلیل کاهش مقاومت پوشش بتن و افت عملکرد فولاد خورده شده، تیر عمیق توانایی باربری و شکل‌پذیری خود را تا حد زیادی از دست می‌دهد.



شکل ۱۹. کانتور آسیب خمیری در ناحیه‌ی کششی تیر تحت خوردگی میلگرد طولی در درصدهای (الف) ۰٪، (ب) ۵٪، (پ) ۱۰٪، (ت) ۱۵٪، (ث) ۲۰٪، (ج) ۵۰٪



شکل ۲۰. نمودار تنش - کرنش تیر عمیق تحت خوردگی میلگرد طولی در درصدهای مختلف

۶- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این پژوهش، اثرگذاری نامطلوب ناشی از خوردگی میلگرد طولی را نشان می‌دهد، به طوری که با افزایش درصد خوردگی، کاهش مقاومت برای درصدهای خوردگی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد، به ترتیب: ۰٪، ۱۳/۶۶٪، ۲۲/۳۱٪، ۲۶/۶۸٪، ۳۹/۴۷٪ و ۵۱/۳۸٪ و کاهش سختی شامل: ۰٪، ۱۰/۴۷٪، ۱۸/۳۰٪، ۲۴/۳۸٪، ۳۲/۰۶٪ و ۴۳/۵۷٪ می‌باشد. این موضوع حاکی از آن است که عناصر مورد استفاده در اعمال خوردگی به نرم‌افزار، همچون: کاهش سطح مقطع میلگرد، کاهش مقاومت تسلیم میلگرد، کاهش مقاومت فشاری بتن و کاهش چسبندگی و پیوستگی بین بتن و میلگرد، به مقدار قابل توجهی انتظارات رفتاری را نسبت به مشاهدات آزمایشگاهی برآورده می‌سازد. نحوه آسیب خمیری در کشش نشان‌دهنده تغییر رفتار تیر عمیق از برشی به خمشی در اثر اعمال خوردگی در میلگردهای طولی و ضعف بتن در کشش، می‌باشد. نمودارهای تنش - کرنش نیز به علت افت عملکرد میلگردهای طولی در اثر خوردگی، روند کاهش در تنش و کرنش را با افزایش درصد خوردگی به همراه دارد.

مراجع

1. Aflatoonian J: Reinforcement of deep concrete beams using FRP reinforced polymer sheets. In: *Sixth National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management and the Fifth Specialized Exhibition of Mass Builders of Housing and Construction in Tehran Province 2019*. In Persian.
2. Youping L: Modelling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures. 1996.
3. Yoosefi Moghadam Sheikhan S: Analytical study of the behavior of corrosion-damaged reinforced concrete beams, repaired with FRP. *master thesis*. University of Guilan. ; 2018. In Persian.
4. Berto L, Simioni P, Saetta A: Numerical modelling of bond behaviour in RC structures affected by reinforcement corrosion. *Engineering Structures* 2008, 30(5):1375-1385.
5. Habibi M: Finite element analysis of reinforcement cracks in reinforced concrete beams. *master thesis*. Shahroud University of Technology.; 2019. In Persian.
6. Azimzade MR: Evaluation of performance of reinforced concrete frames due to reinforcement corrosion. *Masters*. Mashhad Ferdowsi University.; 2017. In Persian.
7. Meet S, Trishna C, Naveen K: Investigating the nonlinear performance of corroded reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering* 2021, 44:102640.
8. Yu L, François R, Gagné R: Mechanical performance of deep beams damaged by corrosion in a chloride environment. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 2018, 22(5):523-545.
9. Manjunath R, Narasimhan MC, Bibesh Nambiar C: Performance Evaluation of Deep Beams Using Self-compacting Concrete Subjected to Corrosion. In: *2021; Singapore*. Springer Singapore: 97-107.

10. Han S-J, Joo H-E, Choi S-H, Heo I, Kim KS, Seo S-Y: Experimental Study on Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with Corroded Longitudinal Reinforcement *Materials and Structures* 2019, 12(5).
11. Azam R, Soudki K: Structural performance of shear-critical RC deep beams with corroded longitudinal steel reinforcement. *Cement and Concrete Composites* 2012, 34(8):946-957.
12. Akbarzadeh Bengar H., Ahmadnezhad M, Noroozi M: Experimental Investigations of RC Deep Beams Strengthened in Shear using NSM CFRP System. *Journal of Structural and Construction Engineering* 2018, 5(3):13-171. In Persian.
13. Shayanfar MA, Barkhordari MA, Ghanooni-Bagha M: Effect of longitudinal rebar corrosion on the compressive strength reduction of concrete in reinforced concrete structure. *Advances in Structural Engineering* 2016, 19(6):897-907
14. Vecchio FJ, Collins MP: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *ACI Journal Proceedings* 1986, 83(2):219-231.
15. Cape` M: Residual Service-Life Assessment of Existing R/C Structures. Chalmers University of Technology, Go`teborg ~Sweden! and Milan Univ. of Technology; 1999.
16. Molina FJ, Alonso C, Andrade C: Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2—Numerical model. *Materials and Structures* 1993, 26(9):532–548.
17. Coronelli D, Gambarova P: Structural Assessment of Corroded Reinforced Concrete Beams: Modeling Guidelines *Journal of Structural Engineering* 2004, 130(8):1214–1224.
18. Rodriguez J, Ortega LM, Casal J, Diez JM: Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures. *Proceeding of the 7th International Conference on Durability of Building Materials and Components* 1996:117–126.
19. CEB-FIB. Bond of reinforcement in concrete, vol. 10; 2000.
20. Lorenzis LD, J.G.Teng: Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering* 2007, 38(2):119-143.
21. Val DV, Chernin L: Serviceability Reliability of Reinforced Concrete Beams with Corroded Reinforcement *Journal of Structural Engineering* 2009, 135(8):896-905.
22. Mehrvand M, Soroushnia S, Najafi H, Mamghani MH: The most complete practical reference of Abaqus: Knowledge writer.; 2013. In Persian.
23. Moodi Y, Sohrabi MR, Mousavi SR: Corrosion effect of the main rebar and stirrups on the bond strength of RC beams. *Structures* 2021, 32:1444-1454.