بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی عمران
رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی سازه
پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بررسی رابطه پیوستگی- لغزش آرماتورهای خورده شده و اثر آن بر روی رفتار تیرهای بتن مسلح

نگارنده: آرمین مکرم

استاد راهنما
دکتر فرشید جندقی علایی

استاد مشاور
مهندس محمد جواد میرزایی

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ت ت ع ۹۰/۱۲۱۴
تاریخ: ۹۵/۶/۲۷
ویرایش:

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **آرمین مکرم** به شماره دانشجویی ۹۲۱۳۴۲۴ رشته **مهندسی عمران** گرایش **سازه** تحت عنوان **بررسی رابطه پیوستگی- لغزش آرماتورهای خورده شده و اثر آن بر روی رفتار تیرهای بتن مسلح** که در تاریخ ۹۵/۰۶/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه : عالی امتیاز ۱۹/۵۰) ☑ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۹)
۲ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)
۳ـ خوب (۱۷/۹۹ ـ۱۶)
۴ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	جناب آقای دکتر فرشید جندقی علایی	دانشیار	
۲- استادمشاور	جناب آقای مهندس جواد میرزایی	کارشناس ارشد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	جناب آقای دکتر مهدی گلی	استادیار	
۴- استاد ممتحن اول	جناب آقای دکتر فرنوش باسلیقه	استادیار	
۵- استاد ممتحن دوم	جناب آقای دکتر سید مهدی توکلی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده : جناب آقای دکتر احمد احمدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم با بوسه بر دستان پدرم

به او که نمی‌دانم از بزرگی‌اش بگویم یا مردانگی، سخاوت، سکوت، مهربانی ...

پدرم راه تمام زندگیست

پدرم دلخوشی همیشگیست

تقدیم به مادر عزیزتر از جانم

مادرم ، هستی من ز هستی توست، تا هستم و هستی دارمت دوست

غمگسار جاودانی مادر است

چشم سار مهربانی مادر است

سپاس

از زحمات و الطاف استاد بزرگوار، جناب آقای دکتر فرشید جندقی علایی که در زمان انجام این تحقیق دلسوزانه و بردبارانه مرا یاری و پشتیبانی فرمودند ، و نیز جناب آقای مهندس محمد جواد میرزایی که از مشاوره با ایشان بهره‌مند بودم صمیمانه قدردانی می‌نمایم...

تعهد نامه

اینجانب **آرمین مکرم** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران (سازه) دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه " **بررسی رابطه چسبندگی لغزش آرماتورهای خورده شده و اثر آن برروی رفتار تیرهای بتن مسلح**" تحت راهنمائی دکتر فرشید جندقی علایی، متعهد می شوم.

- **تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.**
- **در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.**
- **مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.**
- **کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.**
- **حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.**

تاریخ ۱۱ / ۰۶ / ۱۳۹۵

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

خوردگی آرماتورهای تعبیه شده در بتن، به عنوان یکی از عوامل تهدید کننده‌ی دوام و پایداری سازه‌های بتن مسلح، در محیط‌های خورنده همچون محیط‌های دریایی می‌باشد. با مطالعه‌ی مکانیزم خوردگی مشخص شده است با گذشت زمان و افزایش سرعت خوردگی، تجمع محصولات خوردگی در اطراف آرماتور باعث کاهش مقاومت پیوستگی بتن و آرماتور گردیده و لذا میزان باربری سازه تحت اثر بارهای سرویس به شدت کاهش پیدا می‌کند. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس این پدیده مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور آزمایش‌های بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن و خمش سه نقطه‌ای در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و پس از انجام صحت‌سنجی و کسب همگرایی لازم بین نتایج نمونه‌ی ساخته شده در محیط نرم‌افزار و نتایج آزمایشگاهی، تاثیر خوردگی بر مقاومت پیوستگی بتن و آرماتور با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بین آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش مشخص شده است ماکزیمم مقدار مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور به شدت متاثر از خوردگی می‌باشد؛ به طوری که با شروع فرآیند خوردگی این مقدار افزایش می‌یابد و با ادامه‌ی این فرآیند از مقاومت پیوستگی بتن و آرماتور کاسته می‌شود. همچنین در درصدهای خوردگی بالا تغییر در مد شکست تیرهای بتن مسلح از حالت خمشی به ترد مشاهده می‌گردد.

کلمات کلیدی: سازه‌های بتن مسلح، خوردگی، مقاومت پیوستگی، تحلیل غیرخطی، آزمایش بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن، آزمایش خمش سه نقطه‌ای.

لیست مقاله‌های استخراج شده از پایان‌نامه :

۱) تحلیل غیر خطی رفتار پیوستگی بتن و آرماتور تحت فرآیند خوردگی

دومین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری

فهرست مطالب

۱- کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- خوردگی آرماتور ۲

۱-۳- تاثیرات خوردگی در سازه‌های بتن مسلح ۴

۱-۴- تاثیر فرآیند خوردگی بر رفتار پیوستگی سازه‌های بتن مسلح ۷

۲- پیوستگی آرماتور و بتن ۹

۲-۱- پیشگفتار ۱۰

۲-۲- ماهیت پیوستگی بین بتن و آرماتور ۱۲

۲-۳- عوامل مؤثر بر رفتار پیوستگی بتن و آرماتور ۱۴

۲-۳-۱-طول گیرایی ۱۵

۲-۳-۲-مقاومت فشاری بتن ۱۶

۲-۳-۳-پوشش بتن روی آرماتور ۱۷

۲-۳-۴-قطر و هندسه آرماتور ۱۷

۲-۳-۵-اثر محصورشدگی ۱۸

۲-۴- مدل تحلیلی شکست پیوستگی ۱۹

۲-۴-۱-شکست Splitting ۱۹

۲-۴-۲-شکست Pull-out ۲۰

۲-۵- روابط ارائه شده برای تبیین رفتار پیوستگی بین بتن و آرماتور ۲۲

۳- پیشینه‌ی تحقیقات انجام شده بر رفتار پیوستگی آرماتور و بتن تحت اثر خوردگی ۲۷

۳-۱- مقدمه ۲۸

۳-۲- مطالعات تحلیلی گذشته ۲۸

۳-۳- مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی رفتار پیوستگی آرماتور خورده شده و بتن ۳۱

۳-۴- مطالعه‌ی پارامتریک بر روی رفتار پیوستگی آرماتور خورده شده و بتن ۳۳

۳-۴-۱-مدل ارائه شده توسط لاندگرین ۳۳

۳-۴-۲-مدل ارائه شده توسط فواراوان ۳۴

۳-۴-۳-مدل ارائه شده توسط شانگ و همکاران ۳۵

۳-۴-۴-مدل ارائه شده توسط سیدر و سند ۳۶

۳-۵- ارزیابی تحقیقات انجام شده ۳۷

۴- قوانین ساختاری در مدل‌سازی بتن مسلح در آباکوس ۳۹

۴-۱- مقدمه ۴۰

۴-۲- حل عددی معادلات دیفرانسیل ۴۱
۴-۳- کلیات روش اجزای محدود ۴۲
۴-۴- مروری بر مفهوم تحلیل غیرخطی ۴۳
۴-۵- جایگاه و اهمیت کالیبراسیون نمونه‌ها ۴۳
۴-۶- نکات قابل توجه در مدلسازی اجزای محدود یک عضو بتن آرمه ۴۴
۴-۷- معرفی گزینه‌های المان‌ها در ABAQUS ۴۵
۴-۷-۱-خانواده ۴۶
۴-۷-۲-درجات آزادی ۴۶
۴-۷-۳-تعداد گره‌ها و مرتبه درون‌یابی ۴۶
۴-۷-۴-فرمول‌بندی ۴۷
۴-۸- مدلسازی رفتار مصالح در آباکوس ۴۷
۴-۸-۱- بتن ۴۷
۴-۸-۱-۱- پارامتر(f) ۴۸
۴-۸-۱-۲- زاویه اتساع (Ψ) ۴۸
۴-۸-۱-۳- پارامتر (Y) ۴۸
۴-۸-۱-۴- پارامتر ویسکوزیته (η) ۴۹
۴-۸-۱-۵- خروج از مرکزیت (e) ۴۹
۴-۸-۱-۶- نمودار تنش – کرنش کششی بتن ۴۹
۴-۸-۱-۷- نمودار تنش – کرنش فشاری بتن ۵۱
۴-۸-۲- فولاد ۵۲
۴-۹- مدلسازی صفحات بارگذاری و تکیه‌گاه در ABAQUS ۵۳
۴-۱۰-نحوه‌ی مدلسازی یک عضو بتن‌آرمه در ABAQUS ۵۴
۵- صحت سنجی ۵۹
۵-۱- مقدمه ۶۰
۵-۲- تحلیل اجزای محدود آزمایش بیرون‌کشیدن آرماتور از بتن ۶۰
۵-۲-۱-مدلسازی ۶۰
۵-۲-۲-خواص مواد ۶۲
۵-۲-۳-اندرکنش ۶۳
۵-۲-۴-بارگذاری و تحلیل ۶۵
۵-۲-۵-صحت‌سنجی و بررسی خروجی‌های تحلیل ۶۷
۵-۳- تحلیل اجزای محدود آزمایش خمش سه نقطه‌ای تیر بتن مسلح ۶۹
۵-۳-۱-مدلسازی ۶۹
۵-۳-۲-خصوصیات مواد ۷۰
۵-۳-۳-اندرکنش ۷۱

۵-۳-۴-مش‌بندی ۷۱
۵-۳-۵-بارگذاری و تحلیل ۷۳
۵-۳-۶-صحت‌سنجی و بررسی خروجی‌های تحلیل ۷۳
۶- بررسی اثر خوردگی بر رفتار پیوستگی تیرهای بتن مسلح ۷۵
۶-۱- مقدمه ۷۶
۶-۲- نمونه‌ها ۷۷
۶-۳- نحوه‌ی اعمال فرآیند خوردگی ۷۷
۶-۴- نتایج بدست آمده از تاثیر فرآیند خوردگی بر آزمایش بیرون کشیدگی ۸۰
۶-۵- نتایج بدست آمده از تاثیر فرآیند خوردگی بر آزمایش خمش سه نقطه‌ای ۸۴
۶-۶- نتایج بدست آمده از تاثیر قطر آرماتور بر مقاومت خمشی تیر تحت اثر خوردگی ۸۹
۶-۷- نتایج بدست آمده از تاثیر مقاومت بتن بر مقاومت خمشی تیر تحت اثر خوردگی ۹۰
۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹۱
۷-۱- مقدمه ۹۲
۷-۲- نتیجه‌گیری ۹۲
۷-۳- پیشنهادات ۹۴
منابع ۹۵

فهرست شکل‌ها

شکل (۱–۱) جزئیات فرایند خوردگی آرماتور در بتن ۴

شکل (۱–۲) کاهش سریع مقاومت و سرویس‌دهی سازه بتن آرمه تحت اثر خوردگی ۵

شکل (۲–۱) چهار حالت پیوستگی در قاب بتن مسلح تحت بارگذاری جانبی ۱۰

شکل (۲–۲) تنش پیوستگی و لغزش در اعضایی که تحت اثر نیروی خمشی قرار دارند ۱۱

شکل (۲–۳) تنش پیوستگی و لغزش در محل اتصال تیر به ستون ۱۱

شکل (۲–۴) تنش پیوستگی و لغزش در محل اتصال ستون به فونداسیون ۱۲

شکل (۲–۵) رابطه‌ی شماتیک تنش پیوستگی- لغزش برای آرماتور ساده و آجدار ۱۳

شکل (۲–۶) تنش کششی حلقوی در بتن اطراف آرماتور و ترک‌های شعاعی ناشی از آن ۱۴

شکل (۲–۷) تاثیر طول پیوستگی در تنش پیوستگی ۱۶

شکل (۲–۸) اثر محصورشدگی بر تنش پیوستگی ۱۹

شکل (۲–۹) مراحل مختلف تنش در اطراف آرماتور محصور در بتن و ناحیه‌ی ترک خورده ۲۰

شکل (۲–۱۰) مدل شکست Pull-out ۲۱

شکل (۲–۱۱) منحنی تنش پیوستگی- لغزش (CEB-FIP) ۲۵

شکل (۳–۱) تصویر شماتیک ترک خوردگی و ریزش پوشش بتنی ناشی از محصولات خوردگی ۲۹

شکل (۳–۲) مدل محدوده‌ی انتقال تحت اثر محصولات خوردگی ۳۰

شکل (۳–۳) الف) آزمایش بیرون کشیدگی ب) آزمایش تیر خمشی ۳۱

شکل (۳–۴) تصویر شماتیک تنش فشاری وارده به بتن ناشی از تغییر شکل محصولات خوردگی ۳۴

شکل (۳–۵) مدلسازی تغییرات حجمی محصولات خوردگی و ترک ناشی از آن ۳۶

شکل (۳–۶) مدل پیوستگی–لغزش آرماتور خورده شده در بتن a)رفتار پیوستگی در حالت بدون ترک‌خوردگی و شکست بیرون-کشیدگی b)رفتار پیوستگی در حالت ترک‌خوردگی و شکست شکافت ۳۷

شکل (۴–۱) خانواده المان‌ها ۴۶

شکل (۴–۲) المان‌های خطی و غیر خطی ۴۷

شکل (۴–۳) نمودار تنش-کرنش کششی بتن برای مدل خسارت پلاستیک ۵۱

شکل (۴–۴) نمودار تنش-کرنش فشاری بتن برای مدل خسارت پلاستیک ۵۲
شکل (۵-۱) جزئیات هندسه‌ی نمونه ی آزماش تاندلو ۶۱
شکل (۵-۲) نمونه‌ی مدل‌سازی شده در ABAQUS ۶۱
شکل (۵–۳) منحنی تنش-کرنش فشاری بتن توسط آیین نامه بتن اروپا..... ۶۲
شکل (۵–۴) مدل سخت‌شوندگی کششی Wahalathantri..... ۶۳
شکل (۵-۵) المان Bond-link ۶۴
شکل (۵–۶) نحوه قرار گیری فنرها و اعمال شرایط مرزی و مش بندی در نمونه..... ۶۶
شکل(۵–۷) منحنی تنش پیوستگی-لغزش اختصاص داده شده به Translatorها..... ۶۶
شکل (۵-۸) مقایسه‌ی تنش پیوستگی نمونه آزمایشگاهی با مدل اجزای محدود نمونه کنترل..... ۶۷
شکل (۵–۹) نتایج تنش پیوستگی در آرماتور و بتن در نرم افزار ABAQUS الف) خرابی کششی ب) خرابی فشاری..... ۶۸
شکل (۵–۱۰) رفتار پیوستگی بتن و آرماتور در تیر بتن مسلح ۶۹
شکل (۵–۱۱) جزئیات هندسه‌ی نمونه‌ی آزمایش گو و همکاران ۷۰
شکل (۵–۱۲) شبکه بندی تیر بتن مسلح..... ۷۲
شکل (۵–۱۳) شبکه بندی آرماتورهای عرضی..... ۷۲
شکل (۵–۱۴) شبکه بندی آرماتورهای طولی کششی و فشاری..... ۷۲
شکل (۵–۱۵) نحوه‌ی بارگذاری و شرایط مرزی در نمونه‌ی تیر بتن مسلح..... ۷۳
شکل (۵–۱۶) مقایسه‌ی تغییرات نیروی خمشی وسط دهانه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی گو و همکاران با مدل اجزای محدود..... ۷۴
شکل (۵–۱۷) نحوه انتشار خرابی بتن کششی در زمان گسیختگی..... ۷۴
شکل (۶–۱) a) تغییرات K(x/r) براساس میزان نفوذ خوردگی b) ضریب اصطکاک خوردگی در سطوح مختلف ۷۹
شکل (۶–۲) منحنی تنش پیوستگی-لغزش نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن (Pull-Out) در ۲٪ خوردگی..... ۸۱
شکل (۶–۳) منحنی تنش پیوستگی-لغزش نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن (Pull-Out) در ۵٪ خوردگی..... ۸۱
شکل (۶–۴) منحنی تنش پیوستگی-لغزش نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن (Pull-Out) در ۱۰٪ خوردگی..... ۸۲
شکل (۶–۵) منحنی تنش پیوستگی-لغزش نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن (Pull-

Out) در ۲۰٪ خوردگی ۸۲
شکل (۶–۶) تغییرات تنش پیوستگی در مقابل جابه‌جایی در درصدهای مختلف خوردگی..... ۸۳
شکل (۶–۷) بیشنه‌ی تنش‌های پیوستگی برحسب درصدهای خوردگی متفاوت در آزمایش بیرون‌کشیدگی..... ۸۴
شکل (۶–۸) منحنی نیرو-جابه‌جایی وسط دهانه‌ی تیر در نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست خمش سه نقطه‌ای در ۶٫۵٪ خوردگی ۸۴
شکل (۶–۹) منحنی نیرو-جابه‌جایی وسط دهانه‌ی تیر در نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست خمش سه نقطه‌ای در ۱۴٪ خوردگی ۸۵
شکل (۶–۱۰) منحنی نیرو-جابه‌جایی وسط دهانه‌ی تیر در نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست خمش سه نقطه‌ای در ۳۲٫۵٪ خوردگی ۸۵
شکل (۶–۱۱) تغییرات کاهش نیروی خمشی بیشینه در درصدهای خوردگی ۶٫۵، ۱۴ و ۳۲٫۵..... ۸۶
شکل (۶–۱۲) تغییرات نیروی خمشی در مقابل خیز وسط دهانه‌ی تیر بتنی در درصدهای مختلف خوردگی در نمونه FHA ۸۷
شکل (۶–۱۳) نحوه‌ی انتشار خرابی بتن کششی در زمان گسیختگی تحت ۲٪ خوردگی ۸۸
شکل (۶–۱۴) نحوه‌ی انتشار خرابی بتن کششی در زمان گسیختگی تحت ۵٪ خوردگی ۸۸
شکل (۶–۱۵) نحوه‌ی انتشار خرابی بتن کششی در زمان گسیختگی تحت ۲۰٪ خوردگی ۸۸
شکل (۶–۱۶) تاثیر قطر آرماتور در نمودار نسبت بارنهایی-درصد خوردگی آرماتور در تیر خمشی با مقاومت ۲۸٫۶ مگاپاسکال ۸۹
شکل (۶–۱۷) تاثیر مقاومت بتن در نمودار نسبت بار نهایی-درصد خوردگی آرماتور در تیر خمشی با آرماتورهای کششی به قطر ۱۴ میلیمتر ۹۰
شکل (۷-۱) تغییرات بیشینه تنش پیوستگی با افزایش درصد خوردگی در آزمایش Pull-out ۹۳

فهرست جداول

جدول (۲-۱) روابط مربوط به مدل‌های عددی تنش پیوستگی..... ۲۳
جدول (۲-۲) روابط تحلیلی تنش پیوستگی-لغزش ۲۵
جدول (۵-۱) مشخصات آرماتور در آزمایش بیرون‌کشیدگی ۶۲
جدول (۵-۲) مشخصات بتن در آزمایش بیرونکشیدگی ۶۲
جدول (۵-۳) مشخصات آرماتور..... ۷۰
جدول (۵-۴) مشخصات بتن..... ۷۰
جدول (۶-۱) پارامترهای محاسباتی جهت تعیین تنش شعاعی در آرماتور ۱۲ میلی‌متر..... ۸۰

فصل اول

کلیات

۱-۱-مقدمه

خوردگی آرماتورهای تعبیه شده در سازه‌های بتن مسلح، یکی از مهمترین دلایل خرابی سازه‌های بتنی در محیط‌های خورنده می‌باشد. در این فصل پس از بیان پدیده‌ی خوردگی آرماتورها، تأثیرات زیانبار خوردگی سازه‌های بتن مسلح و اهمیت آن‌ها ارزیابی می‌شود. سپس، اهمیت بررسی تأثیر فرآیند خوردگی بر رفتار پیوستگی آرماتور با بتن در سازه‌های بتن مسلح ارائه می‌گردد. در انتهای فصل خلاصه-ی اقدامات صورت گرفته در فصل‌های بعدی بیان می‌شود.

۱-۲-خوردگی آرماتور

به‌طورکلی، به واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده، معمولاً یک فلز، و محیط اطراف آن که به تغییر خواص ماده منجر خواهد شد، خوردگی[1] اطلاق می‌شود. پدیده‌ی خوردگی در تمامی دسته‌های اصلی مواد، از قبیل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد. اما وقوع آن در فلزات آن‌قدر شایع و فراگیر است و اثرات مخربی به‌جای می‌گذارد، که هرگاه صحبت از خوردگی به میان می‌آید، ناخودآگاه خوردگی یک فلز به ذهن متبادر می‌شود. خوردگی آرماتور در بتن یکی از رایج‌ترین فرآیندهای خوردگی فلزات می‌باشد. بتن تازه دارای محیطی مرطوب و قلیایی با pH بین ۱۲ تا ۱۳ است. این محیط قلیایی باعث ایجاد یک لایه‌ی اکسید آهن محافظ (لایه‌ی غیرفعال) پیرامون آرماتور گردیده که مانع از پیشرفت خوردگی در بتن مسلح می‌شود. به طور کلی فرآیند خوردگی زمانی آغاز می‌شود که این لایه به دلایل زیر از بین می‌رود:

الف- افزایش میزان یون کلراید در بتن

شایع‌ترین دلیل خوردگی زودرس آرماتور در بتن، قرار گرفتن بتن مسلح در معرض یون‌های کلراید (Cl^-) می‌باشد. این یون‌ها معمولاً در محیط‌های دریایی و همچنین در املاح نمک به‌کار رفته در یخ‌زدایی جاده‌ها، پل‌ها و ... موجود می‌باشند. طبق تئوری غشای اکسید، یون‌های کلراید آسان‌تر از یون‌های دیگر

1 . Corrosion

در لایه‌ی اکسید محافظ نفوذ کرده و باعث آسیب پذیری فولاد در مقابل خوردگی می‌گردند. اگرچه کلرایدها به صورت مستقیم عامل آغاز خوردگی هستند، به نظر می‌رسد که تنها نقش غیر مستقیمی در نرخ خوردگی پس از آغاز آن دارند. عوامل اصلی کنترل نرخ خوردگی آرماتور در بتن، حضور اکسیژن، مقاومت الکتریکی و رطوبت نسبی بتن، pH و دما می‌باشد.

ب- کاهش خاصیت قلیایی بتن

خاصیت قلیایی بتن می‌تواند به دلیل واکنش بتن با گازهای اسیدی مانند دی‌اکسیدکربن (CO_2) از بین برود. هنگامی‌که دی‌اکسیدکربن هوا به داخل بتن نفوذ می‌کند، با هیدروکسیدها (مانند هیدروکسید کلسیم) واکنش می‌دهد و کربنات‌ها (مانند کربنات کلسیم) شکل می‌گیرند. این واکنش سبب کاهش pH تا ۸/۵ می‌گردد که در این شرایط، لایه‌ی غیرفعال اکسید آهن پایدار نمی‌ماند.

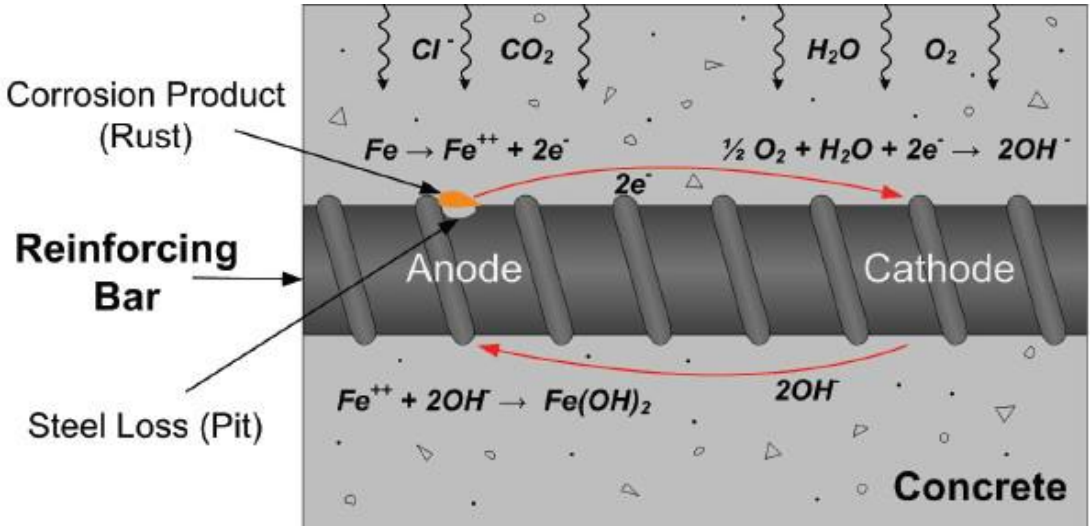
در اثر ناپایداری لایه‌ی محافظ (غیرفعال)، یون‌ها و الکترون‌ها بین دو قسمت مختلف سطح فولاد با پتانسیل الکترو شیمیایی متفاوت، تبادل می‌شوند. این دو بخش آند و کاتد را تشکیل می‌دهند. بنابراین واکنش‌های الکتروشیمیایی در فرآیند خوردگی را می توان به دو بخش آندی و کاتدی تقسیم نمود. فلز (Fe) در محل آند طی واکنش آندی به یون‌های فرو (Fe^{2+}) تجزیه می شود و الکترون‌ها (e^-) آزاد می‌گردند.

$$Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e^- \qquad \text{(واکنش آندی)} \qquad (۱-۱)$$

جهت حفظ تعادل بین بارهای الکتریکی، الکترون‌ها در محل کاتد مصرف شده و با ترکیب شدن با اکسیژن (O_2) و آب (H_2O) تشکیل یون‌های هیدروکسیل (OH^-) را می‌دهند.

$$1/2\ O2 + H2O + 2e^- \longrightarrow 2OH^- \qquad \text{(واکنش کاتدی)} \qquad (۲-۱)$$

با ترکیب شدن یون‌های فرو (Fe^{2+}) و یون های هیدروکسیل، هیدروکسید فرو ($FeOH_2$) تشکیل می‌شود که یک نوع زنگ به رنگ سفید است. سپس این محصول اکسیده می‌شود و هیدروکسید فریک با رنگ قرمز مایل به قهوه ای پدیدار می‌گردد، همان رنگی که معمولاً در هنگام فرآیند خوردگی مشاهده می‌شود.



شکل (۱-۱) جزئیات فرایند خوردگی آرماتور در بتن [۱]

۱-۳- تاثیرات خوردگی در سازه‌های بتن مسلح

علی رغم عملکرد مطلوب بتن در سازه‌های بتن مسلح، خوردگی آرماتورها در یک دهه‌ی گذشته مهمترین مسئله‌ی دوام بتن مسلح در محیط‌های خورنده شدید و حتی متوسط بوده است. به عنوان مثال در سازه‌های دریایی، خوردگی آرماتور قبل از هرگونه هجوم سولفات‌ها صورت گرفته و در چنین محیط‌هایی به عنوان مسئله‌ی بحرانی دوام این سازه‌ها عمل می‌کند.

خوردگی آرماتور در اثر نفوذ یون کلراید باعث کاهش عمر مفید و سرویس دهی سازه‌های بتن مسلح می‌گردد و سالانه خسارات بسیار زیادی را موجب می‌شود. به عنوان مثال هزینه تعمیر پایه‌ی پل‌ها در آمریکا سالانه بین ۵۰ تا ۲۰۰ میلیون دلار می‌باشد. کشور ما نیز سالانه متحمل خسارات زیادی ناشی از این نوع خوردگی در سازه‌های بتن آرمه دریایی در خلیج فارس و دریای عمان و همچنین پل‌های راه و راه آهن می‌شود. آلودگی این سازه‌ها به یون کلراید به طور عمده در محیط‌های دریایی و یا در اثر استفاده از نمک‌های یخ‌زدا در پل‌ها به وجود می‌آید. این آلودگی باعث خوردگی الکتروشیمیایی می‌گردد که رفتار سازه را به سرعت تنزل داده و منجر به کاهش سریع مقاومت و سرویس دهی سازه می‌گردد.

شکل (۱-۲) کاهش سریع مقاومت و سرویس‌دهی سازه بتن آرمه تحت اثر خوردگی

در گذشته اکثر تحقیقات دوام و پایداری سازه‌های بتن آرمه بر روی عملکرد خود بتن، نظیر مقاومت آن در برابر حمله‌ی سولفات‌ها متمرکز بود. در حال حاضر بیشتر خرابی‌ها مربوط به خوردگی فولاد در بتن می‌باشد. علت افزایش این خرابی‌ها، تغییرات متنوعی است که در تکنولوژی بتن و شرایط محیطی به وجود آمده است که عبارتند از:

۱- از آنجایی‌که در کارهای عملی، تنها مقاومت ۲۸ روزه ملاک ارزیابی بتن قرار می‌گیرد، لذا سیمان-های جدیدی به منظور به‌دست آوردن مقاومت بالاتر ساخته شده‌اند که دارای گوگرد (S) و کربن (C) بیشتر و نرمی بالاتر می‌باشند. به‌کارگیری این سیمان‌ها منجر به افزایش نسبت آب به سیمان و تضعیف روند کسب مقاومت دراز مدت بتن می‌گردد. این دو عامل باعث کاهش اثر حفاظتی پوشش بتنی می-شوند.

۲- امروزه برای دستیابی به طرحی اقتصادی و بهینه سعی می‌شود که ضخامت پوشش بتنی تا حد امکان کاهش یابد، لذا در صورتی که این عمل با دقت کافی صورت نگیرد اثر حفاظتی پوشش بتنی کاهش می‌یابد.

۳- به علت متداول شدن استفاده از بتن در نمای ساختمان، هیچگونه اندود دیگری بر روی سطح

بتن اجرا نگردیده است و پوشش بتن به طور کامل در معرض نفوذ یون‌های کلر می‌باشد.

۴- با افزایش استفاده از بتن در سازه‌های دریایی و ساحلی که در محیط اطراف آن‌ها غلظت یون کلر بیش از حد معمول می‌باشد، آسیب‌پذیری سازه‌های بتن آرمه در اثر خوردگی افزایش یافته است.

امروزه با توجه به اهمیتی که استفاده از سازه‌های بتن آرمه در سواحل، به خصوص در اسکله‌ها و سازه‌های دریایی و همچنین میدان‌های اکتشاف و نفت و گاز پیدا کرده‌اند، نیاز به استفاده از سازه‌های بتن آرمه با دوام در برابر خوردگی آرماتورها که بتواند عمر مفید مورد نیاز در این سازه‌ها را تامین نماید، به شدت احساس می‌شود؛ بنابراین باید تمامی عوامل مؤثر در این پدیده به طور کامل بررسی شده و با کنترل این عوامل، سازه‌ای را طراحی نمود که عمر مفید لازم را داشته باشد. لذا مشاهده می‌گردد که امروزه آیین نامه‌های طراحی به سمت طراحی براساس دوام سوق پیدا کرده‌اند و به خصوص در سازه‌هایی که در محیط‌های خورنده‌ی شدید ساخته می‌شوند، توصیه‌ها و محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌ای اعمال نموده‌اند.

مهمترین اثرات خوردگی که باعث کاهش عمر مفید سازه می‌گردند، عبارتند از:

الف- ترک خوردن پوشش بتنی

ب- کاهش مقاومت پیوستگی

ج- کاهش سطح مقطع آرماتور

در اثر فرآیند خوردگی، ترکیب شیمیایی اکسید آهن تولید شده به محیط این فرآیند و واکنش‌های مربوط به آن وابسته است. از میان این محصولات خوردگی، زنگ قرمز آن پایدارتر بوده و دانسیته‌ی کمتری دارد. بنابراین دارای حجم بیشتری از آهن مصرف شده می‌باشد و لذا تجمع این اکسید در اطراف آرماتور باعث ایجاد فشار داخلی در بتن می‌گردد و به پوشش بتنی آسیب می‌رساند (البته این در حالتی است که خوردگی یکنواخت[1] رخ دهد).

فشار داخلی ایجاد شده در اثر این فرآیند باعث ترک خوردن بتن از داخل به سمت خارج شده و در

1 . Uniform

صورت ادامه روند خوردگی منجر به نمایان شدن ترک‌هایی در امتداد آرماتور در سطح بتن می‌شود و در مراحل بعدی باعث متلاشی شدن پوشش در ناحیه وسیعی می‌گردد.

شکل دیگر خوردگی، خوردگی حفره‌ای[1] می‌باشد که در این نوع خوردگی تا زمانی که درصد بالایی از آرماتور خورده نشده باشد، هیچ نشانه‌ی خارجی مشاهده نمی‌گردد. در بررسی اثرات سازه‌ای خوردگی لازم است که بین این دو نوع خوردگی تفاوت قایل گردد، چرا که در خوردگی یکنواخت که در این پایان‌نامه مد نظر است، کاهش مقاومت بتن ناشی از ترک‌خوردگی و کاهش مقاومت پیوستگی و همچنین کاهش سطح مقطع آرماتور رخ می‌دهد. این در حالی است که در خوردگی حفره‌ای تنها کاهش سطح مقطع و ترد شدگی آرماتور مشاهده می‌شود.

۱-۴- تاثیر فرآیند خوردگی بر رفتار پیوستگی سازه‌های بتن مسلح

تاثیر خوردگی بر مقاومت پیوستگی با چند مکانیزم مختلف صورت می‌گیرد. با توجه به این‌که انتقال نیرو بین بتن و آرماتور هم از طریق قفل و بست آج‌های آرماتور و بتن و همچنین از طریق اصطکاک بین آن‌ها صورت می‌گیرد، لذا خوردگی آرماتور و به تبع آن، کاهش ارتفاع آج‌های آرماتور و پوشیده شدن سطح آرماتور از محصولات خوردگی و ترک خوردن بتن باعث کاهش مقاومت پیوستگی می‌گردند. باید به این نکته توجه کرد که در صورت ترک خوردن و ریختن پوشش بتن، اثر محصور کنندگی بتن از بین رفته است و مؤلفه‌ی اصطکاکی مقاومت پیوستگی ناچیز می‌شود. لذا می‌توان گفت که ترک خوردن و ریختن پوشش بتنی گام بلندی به سوی پایان عمر مفید سازه‌های بتن مسلح می‌باشد.

کلیه‌ی تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی بیانگر این مطلب می‌باشند که مدت زمان ترک خوردن پوشش بتن با کاهش قطر آرماتور، افزایش ضخامت پوشش و همچنین افزایش مقاومت کششی بتن، افزایش می‌یابد. این نکته حائز اهمیت می‌باشد که مدت زمان ترک خوردن و ریختن پوشش بتنی به شدت وابسته به نوع محیط خورندگی است و تخمین مشخصات و شدت محیط خورنده، اولین گام در ارئه

2 . Pitting

مدل مکانیکی مناسب برای بررسی آسیب‌های وارده به سازه می‌باشد. تحقیقات آزمایشگاهی در چند سال اخیر جهت پیش‌بینی مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور تحت شرایط مختلف خوردگی انجام شده است تا امکان پیش بینی این رفتار در شدت‌های مختلف خوردگی باشد.

در این پایان نامه با هدف تحلیل نتایج آزمایشات دیگر محققین، مدلی عددی ارائه گردیده است تا قابلیت پیش‌بینی رفتار پیوستگی بین بتن و آرماتور با لحاظ اثرات فرآیند خوردگی در سازه‌های بتن مسلح باشد. چرا که با داشتن مدلی عددی می‌توان جنبه‌های مختلف خوردگی را برای سازه‌های مختلف بررسی نمود و به یک دستورالعمل جامع برای طراحی سازه‌های جدید در معرض محیط‌های خورنده شدید و متوسط دست یافت.

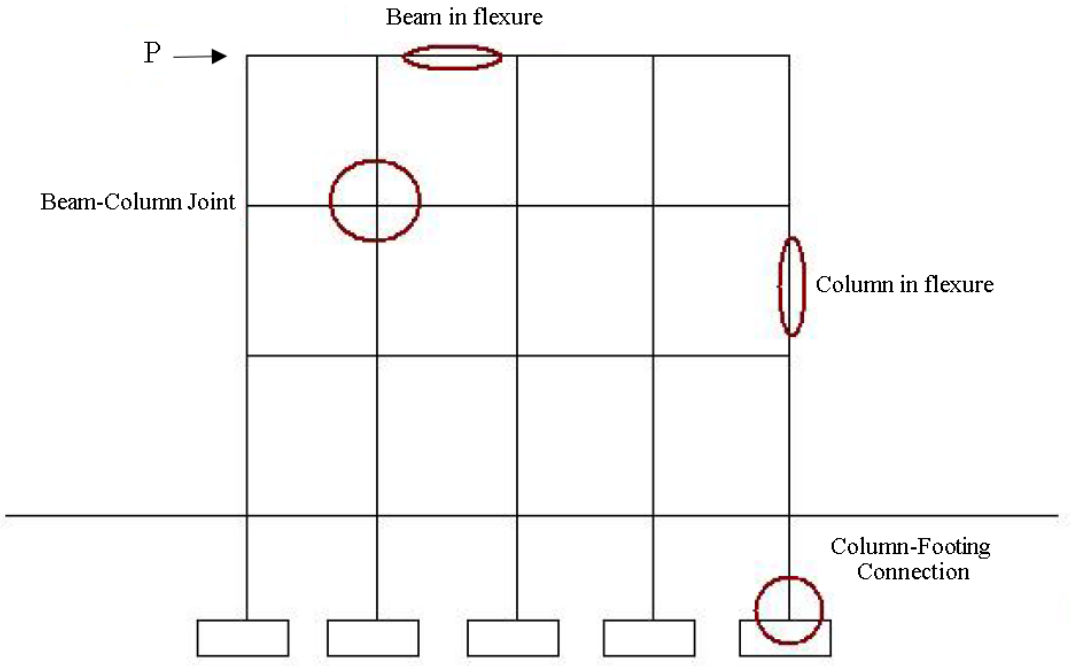
در فصل دوم به بررسی رفتار پیوستگی بین بتن و آرماتور پرداخته شده است. در فصل سوم تحقیقات انجام شده در چند سال اخیر بر رفتار پیوستگی سازه‌های بتن مسلح تحت اثر خوردگی ارائه می‌گردد و در ادامه مدل تحلیلی جهت پیش‌بینی رفتار پیوستگی بین بتن و آرماتور خورده شده بررسی می‌گردد.

فصل دوم

پیوستگی آرماتور و بتن

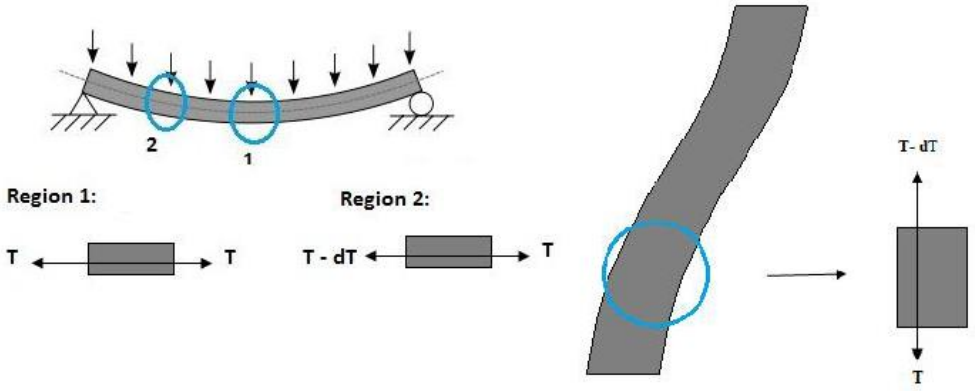
۲-۱- پیشگفتار

شکست پیوستگی، یکی از حالت‌های مهم شکست در اعضای بتن مسلح تحت خمش می‌باشد. ایجاد مقاومت پیوستگی لازم، جهت تامین ظرفیت مطلوب عضو بتن مسلح، به ویژه در قسمت‌هایی که آرماتورها قطع می‌شوند، موضوع مهمی است که در هنگام طراحی سازه باید مورد توجه قرار گیرد. در شکل ۲-۱ سازه‌ای بتن مسلح تحت یک بار جانبی قرار دارد. با تحلیل تنش پیوستگی و جابه‌جایی نسبی اعضای بتن مسلح، به طور کلی چهار حالت متفاوت تنش- جابه‌جایی در سازه‌ی بتن مسلح وجود دارد.



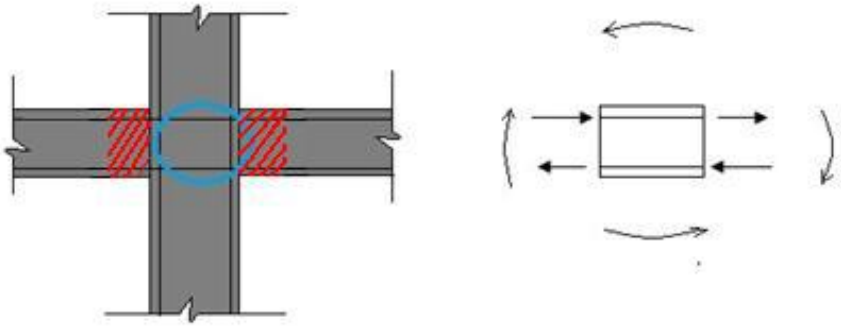
شکل (۲-۱) چهار حالت پیوستگی در قاب بتن مسلح تحت بارگذاری جانبی [۲]

در شکل ۲-۲ برهم کنش نیروهای کششی را در یک المان کوچک از عضو بتن مسلح که تحت اثر خمش قرار دارد، مشاهده می‌شود. در حالت (۱) و (۲)، بتن تیر و ستونی که تحت اثر خمش قرار دارد ترک خواهد خورد که منجر به تغییر تنش پیوستگی در طول عضو می‌شود. در این دو حالت لغزش آرماتور در بتن که باعث ایجاد ترک‌های خمشی در عضو می‌گردد اندک است ولی تنش پیوستگی در آن‌ها به نسبت بالا می‌باشد.



شکل (۲-۲) تنش پیوستگی و لغزش در اعضایی که تحت اثر نیروی خمشی قرار دارند [۲]

حالت (۳) در محل اتصال تیر به ستون می‌باشد که معمولاً محل تشکیل مفصل پلاستیک[1] جهت رفتار شکل‌پذیر قاب است. این محل با رنگ قرمز در شکل ۲-۳ نشان داده شده است که به دلیل نیروهای جانبی ناشی از زلزله، مفصل مورد نظر به طور پی‌درپی تحت اثر نیروی کشش و فشار قرار می‌گیرد. در این حالت لغزش آرماتور از داخل بتن و تنش پیوستگی در آن بسیار زیاد می‌باشد.

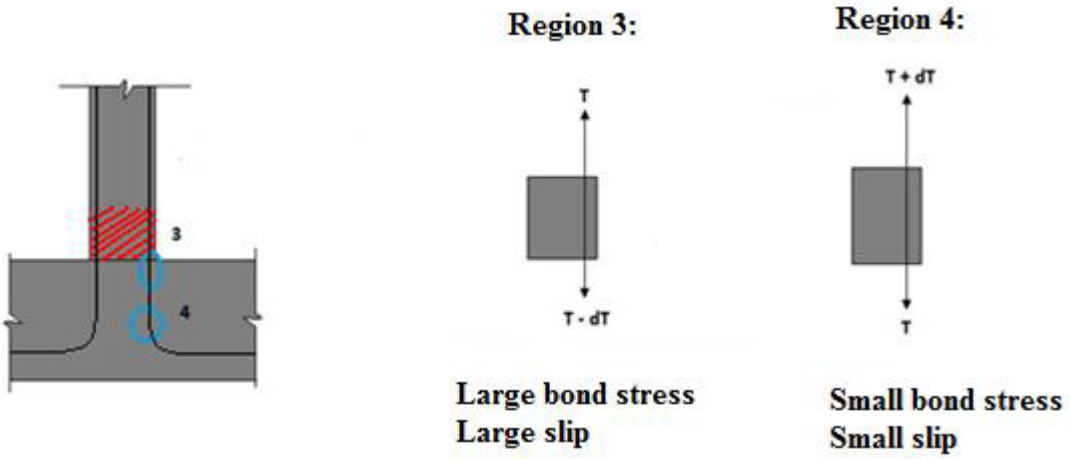


شکل (۲-۳) تنش پیوستگی و لغزش در محل اتصال تیر به ستون [۲]

حالت (۴) در محل اتصال ستون با فونداسیون می‌باشد که همانطور که در شکل ۲-۴ مشاهده می‌کنید، جهت کاهش طول مهاری آرماتورهای طولی ستون در فونداسیون، با خمی ۹۰ درجه آن‌ها را در داخل فونداسیون مهار می‌نمایند. به طور کلی در سازه‌های بتن مسلح دو نوع تنش پیوستگی وجود دارد: ۱- پیوستگی ناشی از نیروی خمشی (حالت ۱و۲) ۲- پیوستگی ناشی از مهار آرماتورهای طولی (حالت ۳و۴) که با توجه به تحقیقات صورت گرفته نقش به سزایی در سختی و مقاومت یک سازه بتن مسلح

1 . Plastic hinge

دارند. بنابراین آشنایی با رفتار پیوستگی در محل مهار اعضا، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد.



شکل (۲-۴) تنش پیوستگی و لغزش در محل اتصال ستون به فونداسیون [۲]

مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور به عوامل مختلفی چون مشخصات مکانیکی بتن و آرماتور، حداکثر میانگین تنش پیوستگی قابل ایجاد در طول آرماتور و چگونگی توزیع تنش پیوستگی در راستای طول آرماتور وابسته است. لازم به ذکر است طول لازم جهت تامین مقاومت پیوستگی معادل ظرفیت کششی نهایی در بتن مسلح، طول پیوستگی[1] نامیده می‌شود [۳].

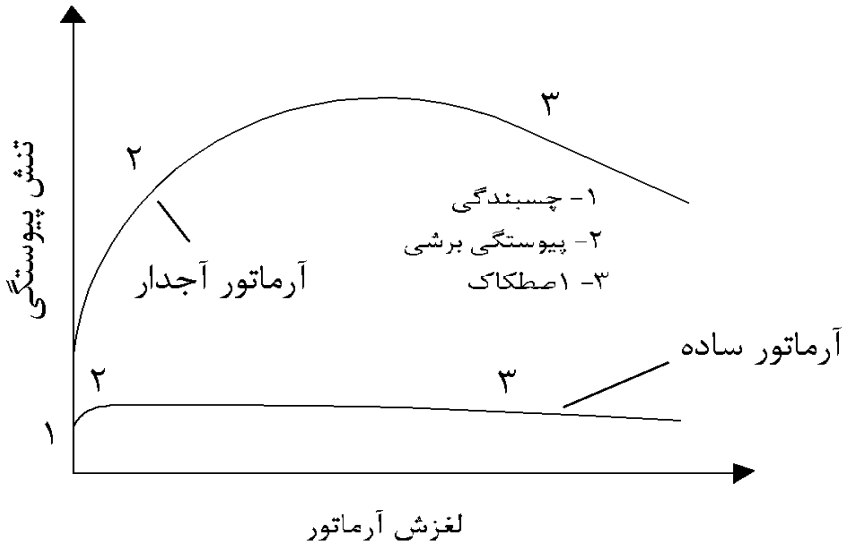
در این فصل ابتدا ماهیت پیوستگی بین بتن و آرماتور و عوامل مؤثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته و سپس تحقیقات صورت گرفته در مورد پیوستگی بین بتن و آرماتور به طور خلاصه ارائه می‌گردد.

۲-۲- ماهیت پیوستگی بین بتن و آرماتور

مقاومت پیوستگی بین آرماتور و بتن ناشی از سه مکانیزم چسبندگی شیمیایی، پایداری استاتیکی و قفل و بست مکانیکی است. هنگامی که آرماتور دچار تغییر شکل محوری می‌شود، اولین عامل ایجاد کننده‌ی پیوستگی بین بتن و آرماتور، چسبندگی شیمیایی بین سطح آرماتور و بتن چسبیده به آن است که به طور عمده وابسته به جنس و ترکیب شیمیایی آرماتور و بتن و نیز مشخصات هندسی آرماتور می‌باشد. با افزایش تغییر شکل، تنش پیوستگی برشی در بتن اطراف آرماتور ایجاد می‌شود که به شدت

1 . Bond length

وابسته به مشخصات سطح آرماتور است. با رسیدن تنش پیوستگی به حد مقاومت پیوستگی لغزش موضعی اتفاق می‌افتد. در آرماتورهای با سطح صاف (آرماتورهای ساده)، بسته به میزان مقاومت اصطکاکی آرماتورها، لغزش به سمت خارج اتفاق می‌افتد و در نتیجه شکست از نوع لغزش[1] خواهد بود. در این نوع آرماتورها مکانیزم اصطکاک فعال نمی‌شود و مقدار تنش برشی قابل تحمل توسط بتن، ظرفیت مقاومت پیوستگی را مشخص می‌نماید. در آرماتورهای با سطح ناصاف (آرماتورهای آجدار)، پس از ایجاد لغزش، به دلیل هندسه سطح آرماتور، به طور عمده چفت و بست مکانیکی بین بتن و آج‌های آرماتور سبب از بین رفتن مقاومت پیوستگی می‌گردد. در این نوع آرماتورها، شکست نهایی پیوستگی با خرد شدن بتن اطراف آرماتور به صورت استوانه‌ای رخ می‌دهد. شکل (۵-۲) رابطه‌ی تنش پیوستگی با لغزش را برای آرماتور آجدار و ساده نشان می‌دهد.

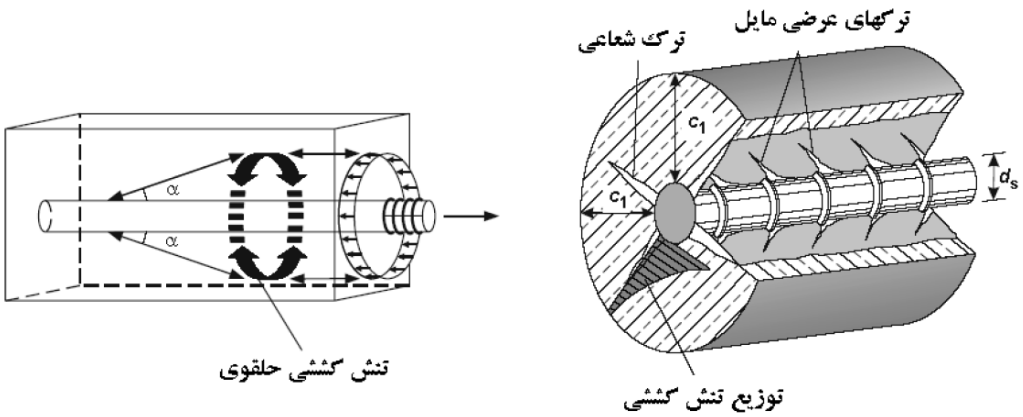


شکل (۲-۵) رابطه‌ی شماتیک تنش پیوستگی- لغزش برای آرماتور ساده و آجدار

در میان مکانیزم‌های پیوستگی، پیوستگی برشی آرماتور آجدار با بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا بیشترین تنش پیوستگی را ایجاد می‌کند. در این مکانیزم پیوستگی، انتقال نیرو از طریق درگیر شدن آج‌های آرماتور و کلیدهای بتنی بین آن‌ها انجام می‌شود. در نتیجه، در محل تماس آج

1 . Splitting

آرماتور و بتن، فشاری ایجاد می‌شود که در اثر آن در مقطع عرضی بتن اطراف آرماتور، تنش‌های حلقوی کششی در کلیدهای بتنی بین آج‌ها، منجر به تولید تنش برشی می‌شود. با توجه به این میدان تنش، دو نوع حالت شکست پیوستگی قابل پیش‌بینی است. اگر تنش برشی موجود درکلیدهای بتنی بین آج‌های آرماتور از حد مقاومت برشی بتن بگذرد، آرماتور به سمت خارج حرکت می‌کند و شکست از نوع بیرون کشیده شدن[1] آرماتور از بتن خواهد بود. در این نوع شکست مکانیزم اصکاک فعال می‌شود و با حفظ نیروی ناشی از پیوستگی، از گسیختگی ناگهانی عضو جلوگیری می‌کند. اگر تنش‌های حلقوی کششی، پیش از آن‌که کلید بتن بین دو آج مجاور به صورت برشی کنده شود، از حد مقاومت کششی بتن تجاوز کند، ترک‌های شعاعی در بتن اطراف آرماتور ایجاد می‌شود که منجر به خردشدگی پوشش بتنی اطراف آرماتور و گسیختگی و شکافت بتن می‌گردد (شکل ۲-۶). در این مرحله از رفتار پیوستگی بتن و آرماتور آجدار، تاثیر اصطکاک در ظرفیت پیوستگی نهایی ناچیز است که در نتیجه شکست از نوع ترد و ناگهانی است. این نوع شکست پیوستگی، شکست شکافت[2] نامیده می‌شود.



شکل (۲-۶) تنش کششی حلقوی در بتن اطراف آرماتور و ترک‌های شعاعی ناشی از آن [۴]

۲-۳- عوامل مؤثر بر رفتار پیوستگی بتن و آرماتور

پارامترهای مؤثر بر پیوستگی بتن و آرماتور متعدد هستند و بررسی یکایک آن‌ها دشوار است. پارامترها

1 . Pull-out
2 . Splitting

را می‌توان به صورت زیر به سه گروه تقسیم نمود [۵]:

- پارامترهای وابسته به آرماتورهای مسلح کننده مانند قطر آرماتور، فاصله آرماتورها، خصوصیات مکانیکی آرماتور، مشخصات سطح آرماتور، بتن‌ریزی نسبت به راستای آرماتور.

- پارامترهای وابسته به بتن مانند خصوصیات مکانیکی بتن، مقاومت نهایی بتن، پوشش بتن روی آرماتور، جهت بتن‌ریزی نسبت به راستای آرماتور.

- پارامترهای وابسته به آزمایش پیوستگی مانند سرعت بارگذاری، جهت بارگذاری، وجود شرایط محصورکننده، شرایط ویژه دستگاه آزمایش.

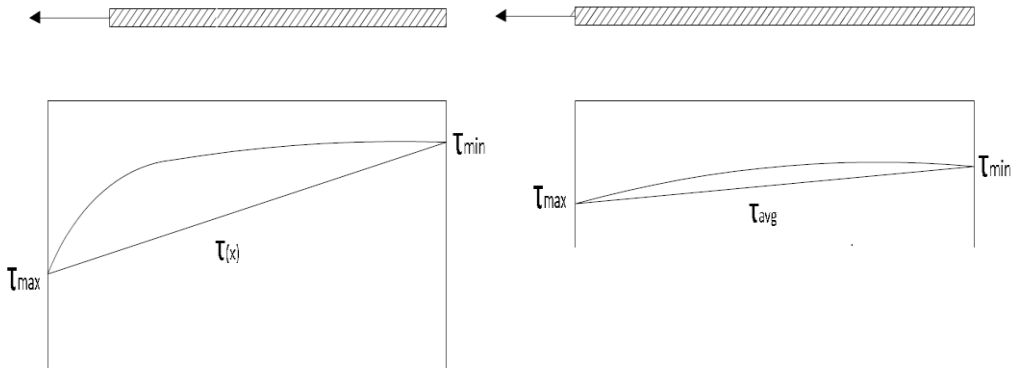
چند مورد از مهم‌ترین پارامترهای عنوان شده که نقش به‌سزایی در میزان تنش پیوستگی دارند، در ادامه به تفصیل تشریح خواهند شد.

۲-۳-۱- طول گیرایی[1]

طول گیرایی، طول بخشی از آرماتور است که با بتن در تماس می‌باشد و تنش پیوستگی در آن ایجاد می‌شود. با افزایش طول گیرایی، نیروی موردنیاز برای بیرون کشیدگی آرماتور از درون بتن افزایش می‌یابد. هنگامی‌که طول گیرایی به‌اندازه کافی بزرگ باشد، آرماتور قبل از بیرون کشیده شدن یا شکافت، جاری می‌شود. حداقل طول گیرایی که برای ایجاد نیروی جاری شدن در آرماتور لازم است به طول پیوستگی معروف است. در اغلب موارد طول پیوستگی به‌عنوان نماینده‌ی مشخصات پیوستگی آرماتور به شمار می‌رود [۶]. طبیعت رابطه‌ی تنش پیوستگی میانگین (نیروی بیرون کشیدگی تقسیم بر سطح ناحیه گیرایی آرماتور)، تجربی است. محققان بر روی طول گیرایی معینی اتفاق نظر ندارند و طول گیرایی در آزمایش‌های مختلف متفاوت است. همانگونه که در شکل ۲-۷ مشاهده می‌فرمایید، توزیع تنش پیوستگی در اطراف طول‌های پیوستگی زیاد، غیر یکنواخت می‌باشد. هنگامی‌که طول گیرایی افزایش

1 . Embeded length
2 . Local test

می‌یابد، میانگین تنش پیوستگی افزایش می‌یابد. بنابراین در آزمایش‌هایی که با طول پیوستگی کم صورت می‌گیرند، می‌توان از اثر طول صرف نظر کرد که این دسته‌ی آزمایش‌ها، آزمایش موضعی[1] نام دارد.



شکل (۲-۷) تاثیر طول پیوستگی در تنش پیوستگی

۲-۳-۲- مقاومت فشاری بتن

داروین[2] و همکاران نشان دادند که تأثیر مقاومت بتن بر مقاومت پیوستگی آرماتورهای محصور نشده و محصورشده توسط فولاد گذاری جانبی را می‌توان با $(f_c')^{1/4}$ متناسب دانست [۷]. اصفهانی و همکاران نشان دادند که مقاومت بتن سه اثر مهم بر مقاومت پیوستگی دارد [۸]:

- افزایش در مقاومت کششی بتن اطراف آرماتور، مقاومت پیوستگی موضعی را افزایش می‌دهد.
- افزایش در مقاومت بتن مقابل شیارهای آرماتور، زاویه شکافت (شکل ۲-۶) را کاهش و درنتیجه مقاومت پیوستگی موضعی را افزایش می‌دهد.
- افزایش در مقاومت بتن، یکنواختی توزیع تنش پیوستگی را در طول آرماتور کاهش می‌دهد، درنتیجه تنش پیوستگی معادل یکنواخت در لحظه شکست کاهش می‌یابد. به همین دلیل مقاومت پیوستگی نرمالیزه شده نسبت به ریشه دوم مقاومت فشاری، در بتن مقاومت بالا برای طول‌های کوتاه‌تر، بزرگ‌تر

1 . Drawin et al

و برای طول‌های بلندتر کوچک‌تر است.

۲-۳-۳- پوشش بتن روی آرماتور

یکی از پارامترهای مهم که پیوستگی میان بتن و آرماتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد، پوشش بتنی روی آرماتور است. به سادگی قابل‌تصور است که چگونه پوشش بتن مقاومت پیوستگی و خصوصیات سطح تماس را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بتنی که اطراف یک آرماتور تحت کشش را احاطه کرده است، تحت اثر تنش‌های کششی قرار دارد. هنگامی‌که پوشش بتن کوچک باشد، بتن ممکن است تحت اثر این تنش‌های کششی بشکند.

تأثیر پوشش بتن بر مقاومت پیوستگی نهایی توسط محققین بررسی شده است. فرگوسن[1] و همکاران نشان دادند که نمونه‌های موضعی با پوشش بیشتر، از خود، مقاومت پیوستگی بالاتری نشان می‌دهند [۹]. آزمایش‌های بیرون کشیدگی انجام شده توسط فرگوسن و همکاران، نشان داد که شکست شکافت، بیشتر در نمونه‌های بتنی با پوشش کمتر نسبت به نمونه‌های با پوشش بیشتر رخ می‌دهد [۱۰]. چینن[2] و همکاران تأثیر پوشش بتن بر مقاومت پیوستگی وصله‌ها را موردبررسی قراردادند [۱۱]. ابریشمی و همکاران تلاش کردند تا یک تعریف کلی از قانون پیوستگی موضعی تحت اثر نیروهای کششی ارائه نمایند. هنگامی‌که پوشش بتن به اندازه کافی ضخیم باشد تا از شکافت بتن جلوگیری کند، خرد شدن بتن جلوی شیارهای آرماتور اتفاق خواهد افتاد؛ بنابراین شکست شکافت تحت اثر بار بیشتری، درنتیجه‌ی فرآیند حاصل از حرکت بتن خردشده، اتفاق می‌افتد. در یک پوشش خیلی ضخیم، ترک‌های برشی در فاصله بین شیارها رخ می‌دهد؛ بنابراین به جای شکست شکافت، شکست بیرون کشیدگی رخ می‌دهد [۱۲].

۲-۳-۴- قطر و هندسه آرماتور

تنش برشی طولی بین آرماتور و بتن اطراف آن با کاهش ناحیه سطح تماس که تابعی از قطر آرماتور

1 . Ferguson et al
2 . Chinn

است، کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که اندازه قطر آرماتور بر مقدار تنش پیوستگی مؤثر است. در آزمایش‌های بیرون کشیدگی انجام‌شده توسط ویواتاناتپا[1] و همکاران نشان داده شد که مقاومت پیوستگی با افزایش قطر آرماتور افزایش می‌یابد [۱۳]. داروین و همکاران و همچنین داروین و گراهام[2] نشان دادند که افزایش در سطح نسبی شیار آرماتور (نسبت تصویر سطح شیار در جهت عمود بر محور آرماتور به حاصل‌ضرب قطر اسمی آرماتور در فاصله مرکز تا مرکز شیار) مقاومت پیوستگی بین آرماتور و بتن را، در آرماتورهای محصورشده توسط فولاد گذاری جانبی، افزایش می‌دهد [۷] و [۱۴].

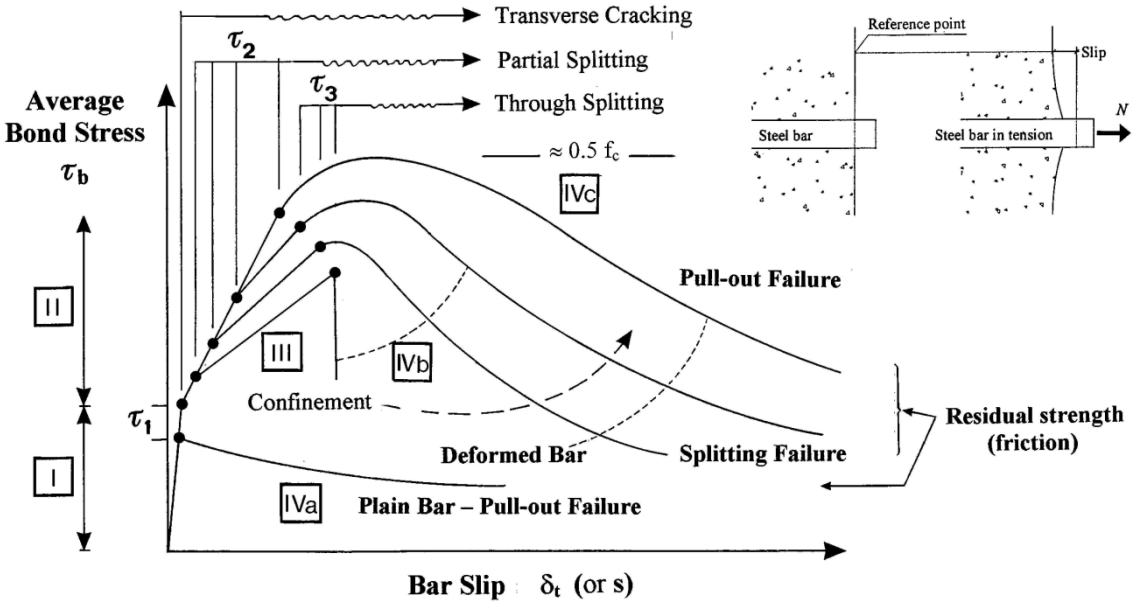
ژاو[3] و همکاران نشان دادند که مقاومت پیوستگی آرماتورهای محصورشده توسط فولاد گذاری جانبی، با افزایش سطح نسبی شیار و قطر آرماتور افزایش می‌یابد[۱۵]. آن‌ها نشان دادند که توسعه خسارت در سطح تماس بتن-فولاد به مقاومت بتن و الگوی شکل آرماتور بستگی دارد. بر اساس تحقیقات انجام‌شده توسط سورتز[4] و همکاران، رهم[5] و لوتز[6]، هنگامی‌که زاویه شیار آرماتور بین ۴۰ تا ۱۰۵ درجه باشد، عملکرد پیوستگی به میزان قابل توجهی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد[۱۸-۱۶]. اما هنگامی‌که زاویه‌ی شیار از ۳۰ درجه کمتر می‌شود، عملکرد پیوستگی متفاوت خواهد بود. همچنین داروین و گراهام گزارش دادند که در آرماتور با زاویه شیار کمتر، مقاومت پیوستگی کمتری به وجود خواهد آمد [۱۴].

۲-۳-۵- اثر محصورشدگی

تاسیوس[7] بیان کرد که با افزایش نیروی بیرون کشیدگی بعد از ایجاد ترک، لغزش آرماتور درون بتن آغاز می‌شود [۱۹]. همانطور که در شکل ۲-۸ مشاهده می‌شود، با افزایش لغزش به دامنه‌ی ترک‌ها افزوده شده تا اینکه بر اساس محصورشدگی‌های متفاوت، انواع مختلف شکست بیرون کشیدگی و شکافت اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر محصورشدگی می‌تواند نوع شکست را برای نمونه‌ها تغییر دهد و یا حتی

1 . Vivatanatpa
2 . Geraham
3 . Zuo et al
4 . Soretz et al
5 . Rehm
6 . Lutz
7 . Tassios

منجر به جاری شدن و تغییر شکل آرماتور شود.



شکل(۲-۸) اثر محصورشدگی بر تنش پیوستگی [۱۹]

۲-۴- مدل تحلیلی شکست پیوستگی

به منظور تحلیل شکست موجود در اعضای بتن مسلح، به بررسی دو نوع شکست شکافت (Splitting) و شکست بیرون کشیدگی (Pull-Out) پرداخته می‌شود.

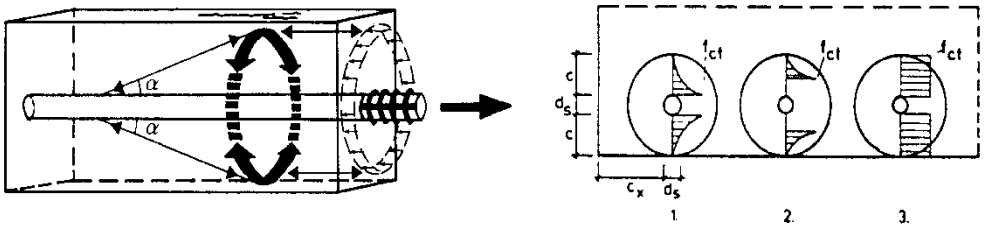
۲-۴-۱- شکست Splitting

ترک‌های عرضی در عضوهای بتن مسلح تحت خمش در اثر کمبود پوشش بتن و میلگردهای عرضی به آسانی تشکیل می‌شوند و ممکن است که در پوشش بتنی گسترش یابند که منجر به شکست شکافت می‌گردد.

مدل ترک الاستیک پیشنهاد شده توسط تپفرز[1] یکی از پرکاربردترین مدل‌های تنش پیوستگی برای خردشدگی بتن می‌باشد [۲۰]. ایده‌ی اصلی این نظریه وجود حلقه‌های تنش کششی است. با استفاده از

1 . Tepfers

تئوری استوانه‌ی جدار ضخیم تیموشنکو[1]، تنش مماسی در سطح محاسبه می‌شود و هنگامی‌که تنش مماسی بزرگ‌تر از تنش کششی بتن می‌گردد ترک‌های خردشدگی اتفاق می‌افتد. تئوری تپفرز که به تئوری استوانه نیمه ترک‌خورده نیز شناخته می‌شود، به این صورت است که در اطراف آرماتور محصور در بتن یک منطقه‌ی ترک خورده منظور می‌کند و بر اساس حالات حدی مختلف تنش، در حلقه‌ی باقی‌مانده‌ی ترک نخورده در اطراف آرماتور، به محاسبات می‌پردازد. حدود بالا و پایین تنش‌های موجود در استوانه‌ی ترک نخورده تپفرز در شکل ۲-۹ نشان داده شده است.



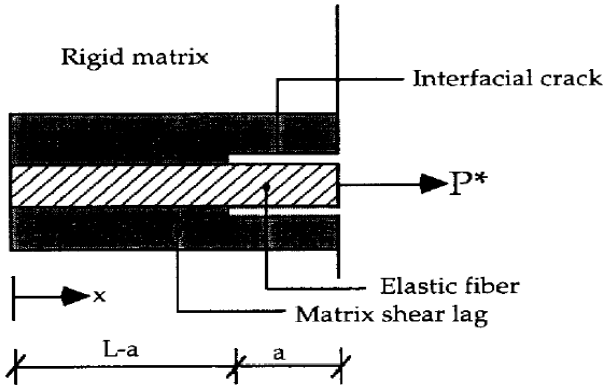
شکل(۲-۹) مراحل مختلف تنش در اطراف آرماتور محصور در بتن و ناحیه‌ی ترک خورده [۲۰]

۲-۴-۲- شکست Pull-out

در صورت کفایت محصورشدگی اطراف آرماتور موجود در بتن، بتن در برابر گسترش ترک‌های عرضی مقاومت نموده و ممکن شکست بیرون کشیدگی ناشی از تنش برشی سطح آرماتور با بتن اطرافش صورت پذیرد که منجر به بیرون آمدن آرماتور از بتن می‌گردد.

استانگ[2] در سال ۱۹۹۰ مدل ریاضی برای این نوع شکست ارائه کرد، که یک میلگرد درون بتن با طول مهاری L مطابق شکل (۲-۱۰) فرض می‌شود [۲۱].

2 . Timoshenko
1 . Stang



شکل (۲-۱۰) مدل شکست Pull-out [۲۰]

و بیان می‌کند:

$$P = E_f A U' \qquad (۲-۱)$$

A مساحت مقطع، E_f مدول یانگ و U' مشتق جابجایی محوری است. بر اساس معادلات تعادل می‌توان نوشت:

$$p - q = 0 \qquad (۲-۲)$$

q نیروی برشی در واحد طول است. در ادامه با توجه به رابطه‌ی ۲-۱ می‌توان نوشت:

$$E_f A U' - q = 0 \qquad (۲-۳)$$

جابجایی در این مدل در سطح تماس تعریف می‌شود:

$$q = KU \qquad (۲-۴)$$

K سختی برشی محیطی بتن است که میلگرد در آن قرارگرفته است.

با کمک شرایط مرزی به این صورت که برای طول، $0 \le x \le (L-a)$ جابه‌جایی در بتن با جابه‌جایی در آرماتور مساوی است و برای طول $(L-a) \le x \le L$ می‌توان نوشت: $q = q^*$

معادلات دیفرانسیل برای جابجایی محوری در میلگرد مطابق روابط زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} U'' - \omega^2 U = 0 & 0 \le x \le (L-a) \\ U'' - \frac{q^*}{E_f A} = 0 & (L-a) \le x \le L \\ \omega = \sqrt{\frac{K}{E_f A}} \end{cases} \qquad (۲-۵)$$

بنابراین بر اساس شرایط مرزی $U'(0)=0,\ E_fAU'(L)=0$ و همچنین شرایط پیوستگی تعریف شده به صورت $U(L-a)^- = U(L-a)^+, U'(L-a)^- = U'(L-a)^+$ و با حل معادله‌های دیفرانسیل بالا، سرانجام می‌توان نوشت:

$$U(x) = \frac{p^* - q^* L}{E_f A\omega} \frac{\cosh(\omega x)}{\sinh[\omega(L-a)]} \qquad 0 \le x \le (L-a) \qquad (۶-۲)$$

$$U(x) = \frac{p^* - q^* L}{E_f A\omega} \coth[\omega(L-a)] - \frac{p^* - q^* L}{E_f A\omega}(L-a) - \frac{q^* L}{2E_f A}(L-a)^2 + \frac{p^* - q^* L}{E_f A\omega} \qquad (۷-۲)$$

$$(L-a) \le x \le L$$

همچنین رویکرد مشابهی در مسائل شکست بیرون کشیدگی توسط هانوش[1] و سالامی[2] ارائه شده است. به طور کلی می‌توان گفت شکست بیرون کشیدگی زمانی رخ می‌دهد که مقاومت تنش پیوستگی در برابر نیروی بیرون کشیدگی کافی نباشد.

۲-۵- روابط ارائه شده برای تبیین رفتار پیوستگی بین بتن و آرماتور

روابط تنش پیوستگی محلی در هر مکان از طول آرماتور تابعی از لغزش محلی آن (S) و بر اساس نتایج آزمایشگاهی با شرایط هندسی متفاوت و بتن‌های با مقاومت مختلف حاصل‌شده است. معادلات تجربی درباره‌ی تنش پیوستگی و لغزش توسط محققینی چون الیگاسن[3] و همکاران در سال۱۹۸۳و شیما[4] و همکاران در سال ۱۹۸۷ پیشنهاد شده است که به صورت گسترده در کارهای طراحی از آن‌ها استفاده می‌شود [۲۲]. همچنین محققین مختلفی معادلات عددی درباره‌ی تنش پیوستگی و لغزش، با استفاده از رگراسیون[5] خطی یا غیرخطی بررسی نمودند که به تعدادی از پر کاربردترین آن‌ها در جدول زیر اشاره شده است.

1 . Hanush
2 . Salami
3 . Eligehausen et al
4 . Shima et al
5 . Regression

جدول (۲-۱) روابط مربوط به مدل‌های عددی تنش پیوستگی [۲۲]

محقق ارائه کننده	معادله‌ی مقاومت پیوستگی بیشینه	واحد
Orangun et al (1997)	$\tau_{\max} = \left[1.22 + 3.23\frac{c}{d_b} + 53\frac{d_b}{l_d}\right]\sqrt{f_c^{'}}$	*Psi*
Kemp & Wilhelm (1979)	$\tau_{\max} = \left[0.55 + 0.24\frac{c}{d_b}\right]\sqrt{f_c^{'}} + 0.191\frac{A_t \cdot f_{yt}}{s.d_b}$	*Si*
Kemp (1983)	$\tau_{\max} = 232.2 + 2.716\frac{c}{d_b}\sqrt{f_c^{'}}$	*Psi*
Chapman & shah (1987)	$\tau_{\max} = \left[3.5 + 3.4\frac{c}{d_b} + 57\frac{d_b}{l_d}\right]\sqrt{f_c^{'}}$	*Psi*
Harajli (1994)	$\tau_{\max} = \left[1.2 + 3\frac{c}{d_b} + 50\frac{d_b}{l_d}\right]\sqrt{f_c^{'}}$	*Psi*
Pillai et al (1999)	$\tau_{\max} = \left[0.1 + 0.25\frac{c}{d_b} + 4.2\frac{d_b}{l_d} + 0.024\frac{A_{tr} \cdot f_{yt}}{s.d_b}\right]\sqrt{f_c^{'}}$	*Si*
Bae (2006)	$\tau_{\max} = A\left(\frac{c}{d_b}\right)^B \times \left(f_c^{'}\right)^{\alpha}, \alpha = \begin{pmatrix} .058 & Deformed \\ 0.21 & Plain \\ 0.45 & GFRP \end{pmatrix}$	*Si*

	LWSCC			NWSCC
Constant	**Deformed**	**GFRP**	**Plain**	**Deformed**
A	۰,۸۵	۰,۴۸	۰,۳	۰,۷۴
B	۰,۱۷	۰,۶۸	۰,۸۸	۰,۵۲

که τ_{max} تنش پیوستگی بیشینه و f_c' مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتن، c میزان پوشش بتن روی آرماتور، d_b قطر آرماتور و l_b طول آرماتور مدفون در بتن است. همچنین در صورت وجود خاموت A_{tr} و f_{yt} به ترتیب مساحت و تنش تسلیم آن می‌باشند. روابط ارائه شده توسط محققین در جدول بالا، تنها به بررسی تنش

پیوستگی بیشینه پرداخته است و رابطه‌ای برای رفتار تنش پیوستگی با لغزش آرماتور ارائه ننمودند. این رفتار به توضیح تنش پیوستگی محلی در هر مکانی از طول آرماتور به صورت تابعی از لغزش آرماتور می‌پردازد که به عوامل مختلفی از قبیل اندازه نمونه‌ها و طول پیوستگی، بستگی دارد [۲۲]. در جدول ۲-۲ چندین رابطه‌ی پیشنهادی تنش پیوستگی- لغزش ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، سه تا از روابط مشابه با رفتار اصلی مربوط به منحنی پیوستگی- لغزش می‌باشد. این روابط از رگرسیون نتایج مدل‌های آزمایشگاهی بدست آمده است.

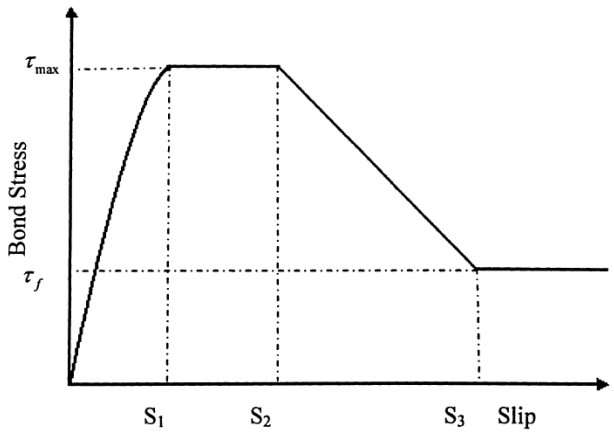
در این پژوهش از رابطه‌ی پیشنهادی توسط CEB-FIP[1]، هوانگ[2] و همکاران و هاراجلی[3] و همکاران که مشابه با منحنی مورد نظر می‌باشد استفاده گردیده است[۲۲].

1 . Euro-International Concrete Committee-International Federation of Prestressing
2 . Huang et al.
3 . Harajli et al.

جدول (۲-۲) روابط تحلیلی تنش پیوستگی-لغزش [۲۲].

محقق ارائه کننده	رابطه‌ی تنش پیوستگی-لغزش	واحد
Barbosa (2001)	$\tau = 19.36s^{0.51}$ (f_c'<50MPa) $\tau = 32.58s^{0.48}$ (f_c'>50MPa)	*Si*
CEB-FIP Huang et al.(1996) Harajili et al.(1995)	$\tau = \begin{cases} \tau_{max}(s/s_1)^{\alpha} & 0 \le s \le s_1 \\ \tau_{max} & s_1 < s \le s_2 \\ \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_u)(s-s_2/s_3 - s_2) & s_2 < s \le s_3 \\ \tau_f & s_3 < s \end{cases}$	*Si*

CEB-FIP	Good bond cond	All other bond cond	Huang	High strength concrete	Normal strength concrete	Harajli	Concrete
S_1 (mm)	1	1.8	S_1 (mm)	0.5	1	S_1 (mm)	$0.15C_{clear}$
S_2 (mm)	3	3.6	S_2 (mm)	1.5	3	S_2 (mm)	$0.35C_{clear}$
S_3 (mm)	C_{clear}	C_{clear}	S_3 (mm)	C_{clear}	C_{clear}	S_3 (mm)	C_{clear}
α	0.4	0.4	α	0.3	0.4	α	0.3
τ_{max}	$2.5\sqrt{f_c'}$	$1.25\sqrt{f_c'}$	τ_{max}	$0.4f_c'$	$0.4f_c'$	τ_{max}	$2.57\sqrt{f_c'}$
τ_f	$0.4\tau_{max}$	$0.4\tau_{max}$	τ_f	$0.4\tau_{max}$	$0.4\tau_{max}$	τ_f	$0.9\sqrt{f_c'}$



شکل (۲-۱۱) منحنی تنش پیوستگی- لغزش (CEB-FIP)

که در روابط ارائه شده در جدول بالا منظور از C_{clear} فاصله‌ی بین آج‌های آرماتور می‌باشد. در مدل ارائه شده توسط CEB-FIP، همانطور که در شکل ۲-۱۱ مشاهده می‌کنید، شاخه صعودی اشاره به فرو رفتن آج‌های آرماتور به داخل زمینه‌ی ملات پوشش بتنی دارد که با ترک خوردگی و تخریب به صورت موضعی همراه است. در ادامه با افزایش شاخه‌ی صعودی تنش پیوستگی به صورت غیرخطی تا نقطه‌ای که $S=S_1$ می‌گردد فزونی می‌یابد. سطح افقی بین S_1 و S_2 تنها برای پیوستگی‌های با محصورشدگی کافی اتفاق می‌افتد که بیانگر تخریب و بریدگی بتن بین آج‌های آرماتور می‌باشد که در این مرحله تنش پیوستگی به بیشینه مقدار خود می‌رسد. شاخه صعودی اشاره به کاهش تنش پیوستگی ناشی از ترک‌ها شکافت (Splitting) در طول آرماتور و از بین رفتن چسبندگی فصل مشترک بین بتن و آرماتور دارد. خط افقی نهایی بیانگر ظرفیت پیوستگی باقی مانده ناشی از تماس اصطکاکی آج‌های آرماتور با بتن دندانه‌ای مجاورش می‌باشد.

$$\tau_{max}= [\ 0.679\ (c/d_b)^{0.6} + 3.88\ (d_b/l_d)]\ (f_c')^{0.55} \qquad (۸-۲)$$

رابطه‌ی ۲-۸، مدل پیشنهادی آقایان اصلانی و شامی‌نژاد برای تنش پیوستگی بیشینه می‌باشد که در این پژوهش، با به‌کارگیری آن به همراه رابطه‌ی تنش پیوستگی- لغزش مدل CEB-FIP، رفتار پیوستگی-لغزش ارائه شده است[۲۲].

فصل سوم

پیشینه‌ی تحقیقات انجام شده بر رفتار پیوستگی آرماتور و بتن تحت اثر خوردگی

۳-۱-مقدمه

در ۱۵۰ سال گذشته بشر بدون استفاده از فلزات و آلیاژها به خصوص فولادها، قادر به ادامه‌ی حیات صنعتی نمی‌باشد. استفاده‌ی روز افزون از این فلزات در صنایع مختلف و کاربرد آن‌ها در محیط‌های جدید و عموماً خورنده، هزینه‌های جبران ناپذیری را پدید آورده است. خوردگی آرماتورها در سازه‌های بتن مسلح به عنوان یکی از زیان‌بارترین دستاوردهای این فرآیند در مهندسی عمران شناخته شده است. در چند سال گذشته، تحقیقات بیشماری بر روی دوام‌پذیری سازه‌های بتن مسلح صورت گرفته است و دوره‌ی زندگی این سازه‌ها در ارزیابی و طراحی براساس دستاوردهای احتمالی که تا کنون حاصل گشته است، به عنوان یک محدودیت تلقی می‌شود. پیش‌بینی رفتار سازه‌های بتن مسلح در حین فرآیند خوردگی منجر به کاهش تخریب کلی و یا جزئی این سازه‌ها و هم‌چنین هزینه‌های ناشی از نگهداری و مراقبت آن‌ها می‌گردد.

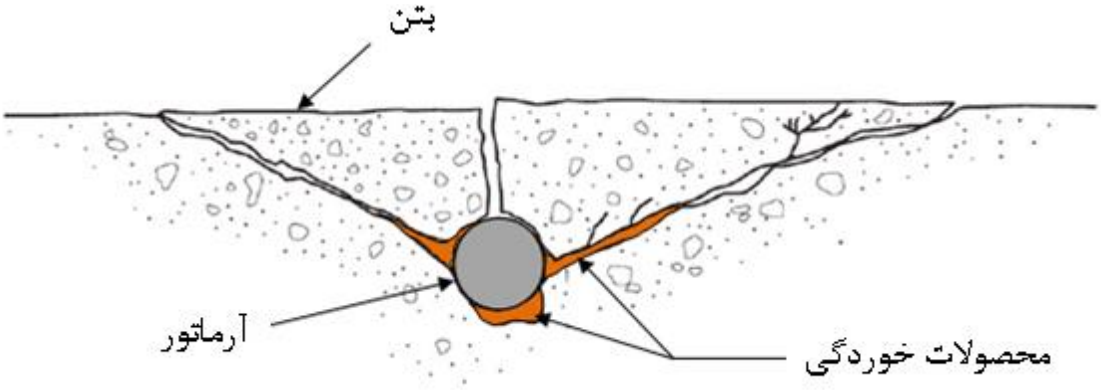
در این فصل مطالعات صورت گرفته تا کنون بر روی رفتار پیوستگی آرماتور و بتن حین فرآیند خوردگی به سه قسمت عمده تقسیم‌بندی می‌شود. بخش اول مربوط به مطالعات تحلیلی انجام گرفته خواهد بود. بخش دوم مربوط به مطالعات آزمایشگاهی می‌باشد و بخش سوم نیز مربوط به مطالعات پارامتریک رفتار پیوستگی آرماتور خورده شده و بتن تا کنون خواهد بود.

۳-۲-مطالعات تحلیلی گذشته

تا کنون تحقیقات بیشماری در زمینه‌ی پیش‌بینی رفتار خوردگی آرماتورها در بتن صورت گرفته است. گلاستون[1] در سال ۱۹۶۴ یکی از اولین محققینی بود که به بررسی رفتار الکتروشیمیایی بین بتن و آرماتور پرداخت [۲۳]. بازانت[2] در سال ۱۹۷۹ یک مدل فیزیکی برای خوردگی آرماتور در بتن مسلح در محیطهای دریای ارائه کرد [۲۴]. او با در نظر گرفتن میزان نفوذ یون‌های اکسیژن و کلر در پوشش بتن، میزان کاهش وزن آرماتور خورده شده را اندازه گرفت. او بر این اعتقاد بود که هرگونه فعل و انفعال بین

1 . Glasstone
2 . Bazant

فلز و محیط اطرافش که منجر به مبادله‌ی الکترون و تخریب آن فلز می‌گردد، خوردگی نام دارد. از آن‌جا که انرژی آزاد محصولات خوردگی کمتر از انرژی آزاد مواد اولیه (فولاد) می‌باشد، واکنش الکترو شیمیایی بین آن‌ها صورت می‌گیرد. نویل[1] در سال ۱۹۹۵به مطالعه‌ی تأثیرات خوردگی بر رفتار پیوستگی بین بتن و آرماتور پرداخت و بیان کرد که خوردگی نه تنها منجر به کاهش سطح مقطع آرماتورها می‌شود؛ بلکه مقاومت پیوستگی فصل مشترک بتن و آرماتور را به دلیل ترک خوردگی و ریزش پوشش بتنی اطراف آرماتور ناشی از تغییرات حجمی محصولات خوردگی تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۵].



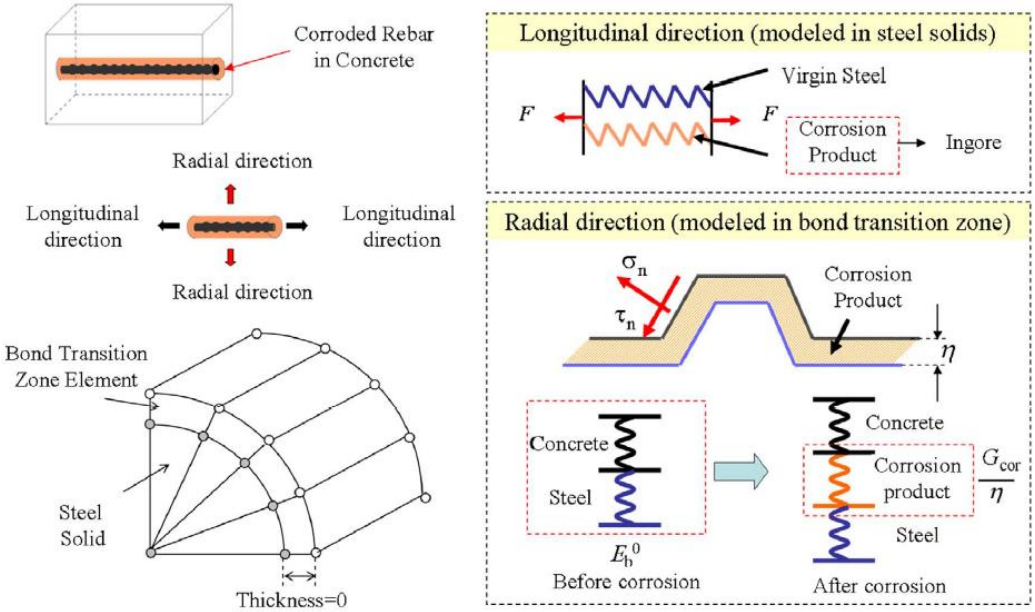
شکل (۳-۱) تصویر شماتیک ترک خوردگی و ریزش پوشش بتنی ناشی از محصولات خوردگی

در سال ۲۰۰۲ کرنلی[2] مدلی تحلیلی که میزان مقاومت پیوستگی برای آرماتورهای خورده شده در سازه‌های بتن مسلح را پیش‌بینی نماید، ارائه کرد [۲۶]. برای این منظور او رابطه‌ای را برای فشار ایجاد شده در فصل مشترک بتن و آرماتور ناشی از انبساط حجمی محصولات خوردگی ارائه نمود. او با استفاده از رابطه‌ی میزان نفوذ محصولات خوردگی و عرض ترک خوردگی که توسط ملینا[3] در سال ۱۹۹۳ ارائه گردید و با فرض عدم نفوذ محصولات خوردگی در ترک‌های ناشی از فرآیند خوردگی، این رابطه را بیان نمود[۲۷]. او همچنین مدل پیوستگی ارائه شده توسط CEB-FIP را با در نظر گرفتن تأثیرات خوردگی اصلاح کرد. همچنین در سال ۲۰۰۶ فانگ[4] و لاندگرین[5] و همکاران رابطه‌ای را برای تنش‌های نرمال

1 . Neville
2 . Coronelli
3 . Molina
4 . Fang et al
5 . Lundgren et al

وارده از طرف بتن به آرماتور، به علت انبساط حجمی محصولات خوردگی با فرض اثرگذاری محصولات خوردگی بر ضریب اصطکاک فصل مشترک بتن و آرماتور ارائه نمود [۲۸].

در سال ۲۰۱۰ شانگ[1] و همکاران با ارائه مدل لغزش جفت باز[2] بیان نمود که در اثر فشار ناشی از محصولات خوردگی در فصل مشترک بین بتن و آرماتور یک حلقه‌ی نیروهای کششی در اطراف آرماتور ایجاد می‌شود [۲۹]. بنابراین همانگونه که در شکل ۳-۲ مشاهده می‌فرمایید محدوده‌ی انتقال به صورت استوانه‌ای حجمی محدود از بتن به همراه ترک‌های موضعی ایجاد شده با آج‌های آرماتور را در بر گرفته است. ضخامت این محدوده مشابه با قطر آرماتور مورد نظر می‌باشد. در این مدل جهت تنش‌های انتقالی با جهت طولی آرماتور به دلیل وجود تنش‌های عرضی یکسان نیست. شانگ با اضافه شدن محصولات خوردگی در فصل مشترک، مدل محدوده‌ی انتقال را به صورت فنرهای طولی و عرضی در نظر گرفت. او از سختی محوری محصولات خوردگی در جهت طولی به دلیل مقدار اندکش صرف نظر کرد. ولی رفتار محدوده‌ی انتقال با اضافه شدن محصولات خوردگی در جهت شعاعی را به صورت فنرهای سری پیشنهاد نمود.

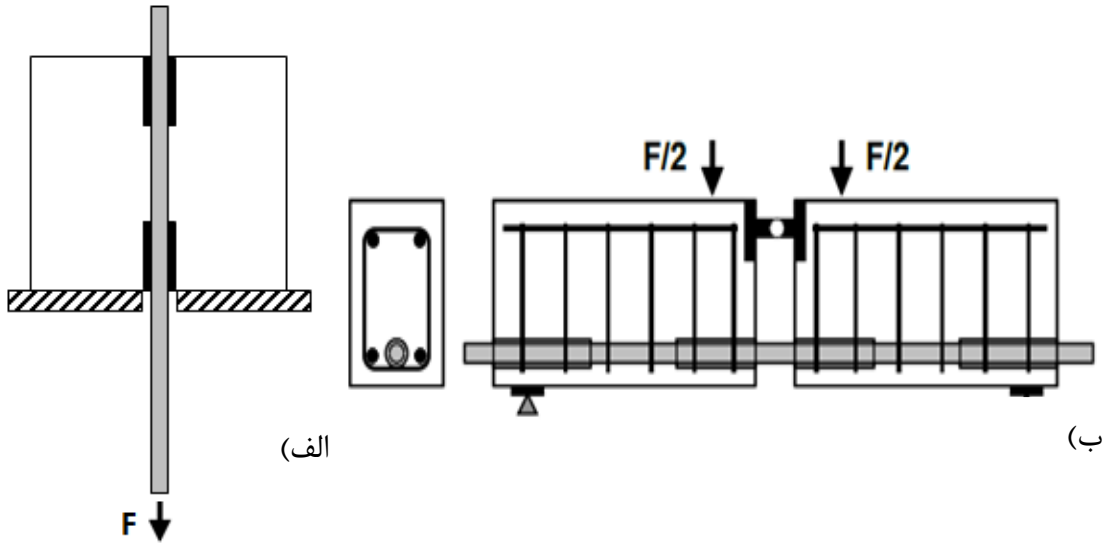


شکل (۳–۲) مدل محدوده‌ی انتقال تحت اثر محصولات خوردگی [۲۹]

1 . Shang
2 . Open-slip coupled

۳-۳-مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی رفتار پیوستگی آرماتور خورده شده و بتن

رفتار بتن مسلح به نیروی کششی منتقل شده از فولاد به بتن بستگی دارد. این انتقال به ویژگی‌های پیوستگی بین آن‌ها وابسته است. با شروع فرآیند خوردگی، شناسایی و تحلیل رفتار پیوستگی دشوار می‌گردد. در دهه‌های اخیر محققان با آزمایش‌های بسیاری اثر خوردگی آرماتور بر مقاومت پیوستگی سازه‌های بتنی را بررسی نمودند. این آزمایش‌ها که به صورت گسترده جهت ارزیابی مقاومت پیوستگی استفاده گردیده‌اند، عبارتند از: آزمایش بیرون کشیدگی هم‌محور و برون محور، آزمایش کشش و آزمایش تیر پیوستگی. به دلیل ساده‌سازی، تحقیقات آزمایشگاهی به دو دسته‌ی آزمایش بیرون کشیدگی و آزمایش تیر خمشی تقسیم می‌شوند. در تمام آزمایش‌ها ذکر شده، نمونه‌ای کنترل جهت تخمین مقاومت پیوستگی در حالت بدون خوردگی لحاظ می‌گردد.



شکل (۳-۳) الف) آزمایش بیرون کشیدگی ب) آزمایش تیر خمشی

در سال ۱۹۹۰ سلیمانی[1] و همکاران [۳۰] با مطالعه‌ی رفتار پیوستگی آرماتورهای خورده شده در بتن دریافتند که تا خوردگی حدود یک درصد کاهش وزنی، مقاومت پیوستگی ناشی از فشار محصولات خوردگی افزایش می‌یابد. این رفتار با نتایج بدست آمده از آزمایش تیر خمشی انطباق داشت. آن‌ها

1 . Al-Suleimani

مشاهده نمودند که مقاومت پیوستگی تا میزان خوردگی چهار درصد افزایش می‌یابد و این مشاهده با دیدگاه آقایان منگات[1] و الگارف[2] هم‌خوانی داشت [۳۱]. مسلمان[3] در سال ۱۹۹۶ [۳۲] نشان داد که قبل از فرآیند ترک‌خوردگی مقاومت پیوستگی افزایش می‌یابد، ولی با افزایش تغییرات حجمی محصولات خوردگی و شروع فرآیند ترک خوردگی مقاومت پیوستگی کاهش می‌یابد. همچنین او با افزایش پوشش بتن، افزایش مقاومت پیوستگی را مشاهده کرد و نتیجه گرفت با میزان مقاومت پیوستگی با محصورشدگی رابطه‌ی مستقیم دارد.

آزمایشات صورت گرفته از طرف کابررا[4]، آمله[5]، میرزا[6] و فانگ افزایش مقاومت پیوستگی را تا خوردگی به میزان دو درصد نشان داد [۳۳]. آن‌ها اظهار کردند که ادامه‌ی فرآیند خوردگی منجر به ترک خوردگی و ریزش پوشش بتنی اطراف آرماتور می‌گردد وکاهش مقاومت پیوستگی را در پی دارد.

بر خلاف نتایج بدست آمده، در سال ۲۰۱۳ منصور[7] و ژانگ[8] با آزمایش تأثیر خوردگی آرماتورها بر مقاومت پیوستگی دو نوع بتن با مقاومت متفاوت، به این نتیجه دست یافتند که تا خوردگی حدود دو درصد مقاومت پیوستگی به مقدار شانزده درصد کاهش می‌یابد [۳۴]. همچنین آن‌ها اظهار کردند که در بتن با مقاومت بالا به دلیل کم بودن فضاهای خالی و قابل نفوذ بتن، فرآیند خوردگی با سرعت کمتری صورت می‌گیرد.

در سال ۲۰۱۵ تاندلو[9] به مطالعه‌ی تأثیر محصورشدگی بر رفتار پیوستگی آرماتور خورده شده با بتن پرداخت [۳۵]. او با انجام آزمایش بیرون کشیدگی موضعی بر روی دو نمونه‌ی محصور نشده و محصور شده با خاموت، تحت چگالی جریان خوردگی بسیار کم جهت تشابه با واقعیت، به این نتیجه دست یافت که مقاومت پیوستگی تا دو درصد خوردگی افزایش می‌یابد و با ادامه‌ی فرآیند خوردگی کاهش آن را

1 . Mangat
2 . Elgarf
3 . Almusallam
4 .Cabrera
5 . Amleh
6 . Mirza
7 . Mansoor
8 . Zhang
9 . Tondolo

مشاهده می‌شود.

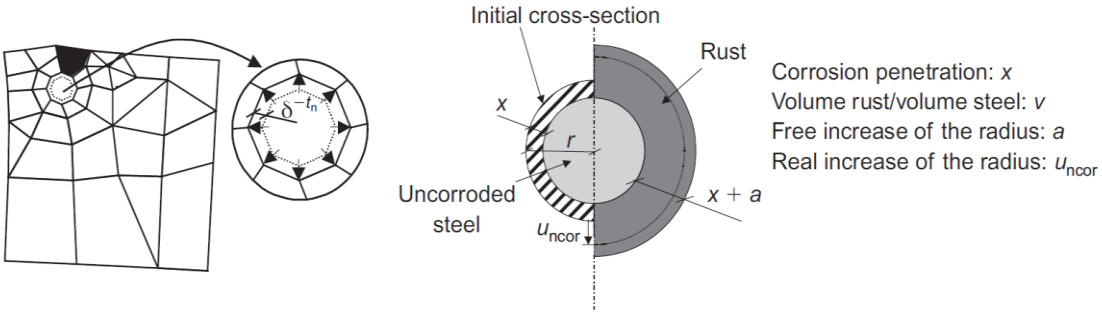
۳-۴-مطالعه‌ی پارامتریک بر روی رفتار پیوستگی آرماتور خورده شده و بتن

با مطالعه‌ی نتایج حاصل شده از آزمایش‌های صورت گرفته، دشوار است که اثر مواد، هندسه و دیگر پارامترها را در بررسی رفتار پیوستگی آرماتور خورده شده در بتن درک نمود. بنابراین محققان جهت فهم بهتر رفتار پیوستگی و تأثیر پارامترهای مختلف، از مدل‌سازی عددی و مطالعه‌ی پارامتریک استفاده می‌نمایند. دانشمندان در ابتدا با استفاده از تحلیل خطی یک بعدی به بررسی رفتار پیوستگی پرداختند و با گذر زمان مدل‌های پیچیده‌تری را ارائه نمودند تا از دقت کافی برخوردار باشد. در ادامه تعدادی از مدل‌های پارامتریک انجام شده توسط محققان به صورت مختصر ارائه گردیده است:

۳-۴-۱- مدل ارائه شده توسط لاندگرین [۳۶]

لاندگرین در سال ۲۰۰۵ به بررسی تأثیر خوردگی بر رفتار پیوستگی و ترک‌خوردگی بتن و آرماتور پرداخت. وی با فرض رفتار خوردگی به صورت یکنواخت از روش تحلیل اجزای محدود سه بعدی، فصل مشترک آرماتور و بتن را در حین فرآیند خوردگی مدل‌سازی نمود. بتن و آرماتور با استفاده از المان‌های جامد[1] مدل گردیدند. همان‌گونه که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌فرمایید، مدل خوردگی و پیوستگی در دولایه‌ی جداگانه در اطراف آرماتور حضور دارد. جهت کاهش زمان تحلیل با کم کردن تعداد گره‌ها در مدل، از ادغام فصل مشترک خوردگی و پیوستگی در یک لایه استفاده نمود. لاندگرین با در نظر گرفتن تغییر شکل ناشی از فرآیند خوردگی و پیوستگی، میزان تنش فشاری وارده به بتن را در جهت شعاعی از طرف آرماتور اعمال کرد و با در نظر گرفتن ضریب اصکاک وابسته به میزان درصدهای خوردگی متفاوت، رفتار پیوستگی و ترک‌خوردگی را براساس آزمایش بیرون کشیدگی و خمش در مدل خود ارائه نمود.

1 . Solid element



شکل (۳-۴) تصویر شماتیک تنش فشاری وارده به بتن ناشی از تغییر شکل محصولات خوردگی [۳۶]

۳-۴-۲- مدل ارائه شده توسط فواراوان[1] [۳۷]

فواراوان در سال ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر خوردگی آرماتورها در رفتار خمشی تیر بتن مسلح با استفاده از تحلیل سه بعدی اجزای محدود پرداخت. او رفتار پیوستگی – لغزش بین بتن و آرماتور را با استفاده از فنرهای غیر خطی[2] مدل نمود. این فنرها هیچ بعدی ندارند و گره‌های المان‌های آرماتور و بتن را به یکدیگر متصل می‌کنند. فواراوان با استفاده از رابطه تنش بیشینه – لغزش ارائه شده توسط کمپ[3] و ویلهم[4] رفتار پیوستگی را به فنرها نسبت داد.

$$\tau_{max} = [0.55+0.24\, C_c/d_b]\sqrt{f_c'} +[0.191(A_t f_{yt})/(S_s d_b)] \qquad (۱-۳)$$

که در این رابطه τ_{max} تنش بیشینه‌ی پیوستگی، Cc کاور بتن، d_b قطر آرماتور، A_t و f_{yt} به ترتیب سطح مقطع و تنش تسلیم خاموت‌ها و Ss فاصله‌ی بین آن‌ها می‌باشد. وی با کاهش سطح مقطع آرماتور ناشی از فرآیند خوردگی و رابطه‌ی ۳-۲ متناسب با میزان درصد خوردگی آرماتورها که منجر به کاهش مقاومت پیوستگی بیشینه می‌باشد مدل خود را ارائه کرد.

$$R=1.346e^{-0.198Xp} \qquad (۲-۳)$$

منظور از Xp میزان درصد خوردگی با توجه به کاهش وزن آرماتور خورده شده و e همان عدد نپر (۲,۷۱۸) می‌باشد. همچنین به این نتیجه دست یافت که درصد کاهش ظرفیت خمشی در وسط دهانه

1 . Phuvoravan
2 . Nonlinear spring
3 . Kemp
4 . Whilhelm

تیر بتن مسلح تا حدودی با میزان پیشرفت خوردگی برابر است.

۳-۴-۳- مدل ارائه شده توسط شانگ و همکاران [۲۹]

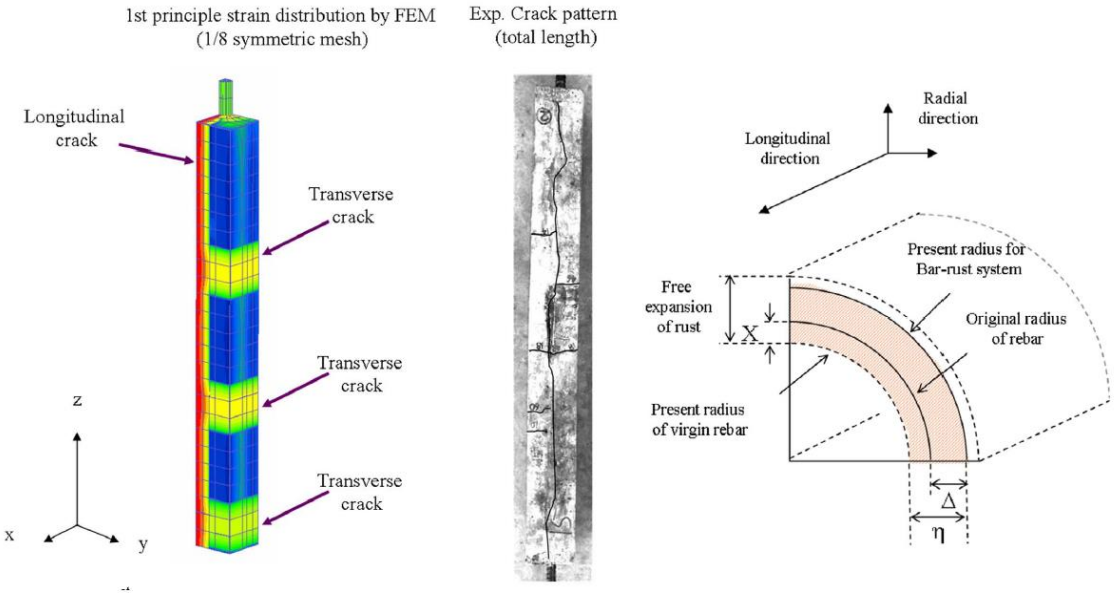
شانگ در سال ۲۰۱۱ با ارائه‌ی مدل فنرها و سختی مرتبط آن‌ها مدل محدوده‌ی انتقال را همراه با محصولات خوردگی به صورت فنرهای موازی در آزمایش خمشی تیر در نظر گرفت. وی سختی مرتبط با محصولات خوردگی را طبق رابطه‌ی ۳-۳ با توجه به تغییر شکل حجمی آن‌ها با افزایش ادامه روند فرآیند خوردگی ارائه کرد. همچنین او به علت عدم تغییر شکل محصولات خوردگی در جهت طولی آرماتور صرف نظر کرد.

$$K_{cor} = d\sigma_n / d\boldsymbol{\eta} = G_{cor} d\varepsilon / d\boldsymbol{\eta} = G_{cor} / \boldsymbol{\eta} \qquad (۳-۳)$$

که K_{cor} سختی محصولات خوردگی (MPa/mm)، G_{cor} مدول یانگ محصولات خوردگی و $\boldsymbol{\eta}$ ضخامت آن می‌باشد. منظور از σ_n تنش نرمال وارده به بتن در جهت شعاعی می‌باشد. بنابراین با استفاده از رفتار فنرهای سری و سختی مرتبط با رفتار پیوستگی فصل مشترک فولاد و بتن رابطه‌ی زیر را برای محدوده‌ی انتقال همراه با محصولات خوردگی ارائه کرد.

$$1/E_b = 1/E_{0b} + 1/ K_{cor} \qquad (۴-۳)$$

که E_{0b} سختی رفتار پیوستگی بتن و آرماتور و E_b همان به همراه محصولات خوردگی می‌باشد. شانگ همچنین تغییرات حجمی ناشی از محصولات خوردگی را مطابق با شکل زیر در مدل خود اعمال نمود تا ترک خوردگی ناشی از محصولات خوردگی نمایان گردد.

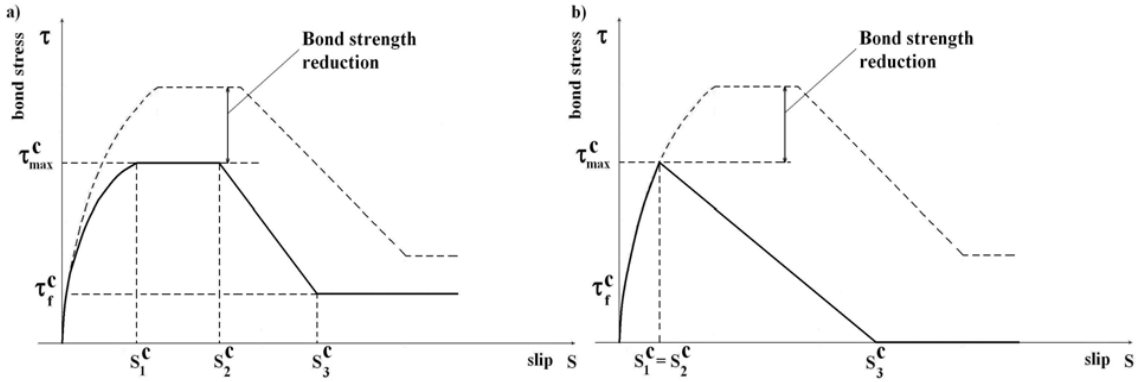


شکل (۳-۵) مدل‌سازی تغییرات حجمی محصولات خوردگی و ترک ناشی از آن [۲۹]

۳-۴-۴- مدل ارائه شده توسط سیدر[1] و سند[2] [۳۸]

سیدر و سند با استفاده از نرم افزار اجزای محدود DIANA رفتار مکانیکی پیوستگی بتن و آرماتور تحت فرآیند خوردگی در آزمایش خمش را بررسی نمودند. آن‌ها با کاهش سطح مقطع آرماتور ناشی از فرآیند خوردگی یکنواخت و حفره‌ای و مدل‌سازی دو بعدی تیر بتنی و آرماتور با رفتار غیر خطی به بررسی عملکرد ترک‌خوردگی و پیوستگی پرداختند. آن‌ها رفتار پیوستگی در حالت بدون خوردگی را با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده توسط CEB-FIP اعمال کردند و با توجه به رابطه‌ی ارائه شده توسط رودریگز[3] میزان کاهش تنش پیوستگی بیشینه و لغزش متناظر با آن را همانگونه که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌فرمایید مطرح نمود.

1 . Seather
2 . Sand
3 . Rodriguez



شکل (۳-۶) مدل پیوستگی – لغزش آرماتور خورده شده در بتن a) رفتار پیوستگی در حالت بدون ترک¬خوردگی و شکست بیرون-کشیدگی b) رفتار پیوستگی در حالت ترک¬خوردگی و شکست شکافت[۳۸]

آن‌ها اظهار کردند که با شروع فرآیند خوردگی و عدم ترک‌خوردگی بتن اطراف آرماتور مود شکست از نوع بیرون کشیدگی و با ادامه فرآیند خوردگی به علت ترک‌خوردگی بتن اطراف آرمانور این مود به شکست شکافت تغییر می‌نماید.

۳-۵-ارزیابی تحقیقات انجام شده

با بررسی مهم‌ترین و شاخص‌ترین تحقیقات انجام شده در رابطه با اثر خوردگی بر رفتار پیوستگی آرماتور و بتن در سازه‌های بتن‌آرمه، نکات حائز اهمیت ذیل قابل استنباط است:

۱- در غالب تحقیقات صورت گرفته، با شروع فرآیند خوردگی به دلیل فشار ناشی از انبساط محصولات خوردگی، افزایش مقاومت پیوستگی صورت گرفته است و با ادامه این فرآیند از مقاومت پیوستگی کاسته می‌شود.

۲- در بیشتر مطالعات پارامتریک صورت گرفته، جهت مدل‌سازی تأثیر خوردگی بر رفتار پیوستگی، به دلیل نبود اطلاعات کافی، از ضرایب حاصل شده در نتایج آزمایشگاهی برای مدل‌سازی فرآیند خوردگی استفاده گردیده است.

۳- در مطالعات صورت گرفته توسط محققان، بررسی موارد زیر همراه با ارزیابی مقاومت پیوستگی آرماتورهای تحت اثر خوردگی انجام می‌گردد:

الف- پیش‌بینی فشار ناشی از انبساط حجمی محصولات خوردگی

ب- مدل‌سازی بتن ترک خورده و تنش کشش باقی‌مانده در سطوح مختلف خوردگی

ج- ارزیابی میزان ضریب اصطکاک و مقاومت چسبندگی بین آرماتور خورده شده و بتن ترک خورده در درصدهای مختلف خوردگی

د- تأثیر سرعت‌های مختلف خوردگی (شدت جریان‌های مختلف) بر پارامترهای عنوان شده.

ه- کاهش اندازه‌ی قطر آرماتور با توجه به نوع فرآیند خوردگی از قبیل یکنواخت یا حفره‌ای

۴- در مدل‌های پیوستگی ارائه شده توسط محققین، مقاومت پیوستگی بیشینه انطباق خوبی با نتایج آزمایشی دارد ولی لازم است با در نظر گرفتن رفتار پیوستگی – لغزش برآورد واقع‌بینانه‌تری به عمل آید.

با بررسی مطالعات انجام شده، کاستی‌ها و ضعف‌های زیر در مطالعات و آزمایشات انجام شده قابل استنباط است.

۱- در اکثر مطالعات و آزمایشات انجام شده نمونه‌های بتن، فولاد و رفتار پیوستگی به صورت رفتار خطی مورد استفاده قرار گرفته است و ضعف مطالعات بر رفتار غیر خطی مشهود است.

۲- بیشتر بررسی‌ها معطوف به آزمایش خمش و یا طول پیوستگی بلند بوده است و تعداد مطالعات صورت گرفته بر آزمایش بیرون‌کشیدگی با طول کوتاه اندک است.

۳- مطالعات پارامتری جامعی بر روی تأثیر خوردگی بر رفتار پیوستگی در لحظه‌ی ترک‌خوردگی بتن صورت گرفته است و با بهره‌گیری از این مطالعات، ارائه‌ی مدلی اجزای محدود که بتوان با استفاده از تأثیر فرآیند خوردگی بر رفتار پیوستگی در تمام لحظات بررسی نمود، لازم می‌باشد.

فصل چهارم

قوانین ساختاری در مدل‌سازی بتن مسلح در آباکوس

۴-۱-مقدمه

روش اجزای محدود، روشی عددی است که می‌توان آن را برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالت‌های مختلف پایدار، خطی یا غیرخطی مانند تحلیل تنش، انتقال حرارت و جریان سیال به کار برد. این روش که ریشه‌های آن به سال‌های اولیه‌ی ۱۹۰۰ میلادی بر می‌گردد، در دهه‌ی ۶۰ میلادی به صورت نظام یافته و مدون، وارد مباحث مهندسی به خصوص مهندسی مکانیک و عمران شده و در دهه‌ی پایانی هزاره‌ی دوم به طور شگفت‌آوری در مراکز علمی و صنعتی جهان رسوخ نمود.

به طور کلی برای حل مسائل فیزیکی سه روش موجود است [۳۹]:

۱- روش تحلیلی دقیق (Exact Solution)

۲- روش عددی (Numerical Solution)

۳- روش تجربی (Experimental Method)

روش حل عددی که اجزای محدود زیر مجموعه آن می‌باشد، جزء یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در حل مسائل مهندسی است. در روش اجزای محدود به طور عمده مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل یا کمینه نمودن انرژی پتانسیل حاکم بر سیستم حل می‌شوند.

بدون شک روش اجزای محدود، انقلابی در صنعت جهان و نحوه‌ی نگرش به تحلیل و طراحی به وجود آورد. حل مسائلی که توسط روش معمول تحلیلی غیر ممکن می‌نمود، قابلیت مدل‌سازی فرآیندهای واقعی صنعتی با کم‌ترین ساده‌سازی‌ها، توانمندی روش در ارائه نتایج قابل اطمینان، کاهش هزینه‌های سنگین تست‌های عملی در فرآیندهای طراحی باعث گردید تا این روش به عنوان جزء جدا نشدنی پیشرفت صنعتی درآید. نرم‌افزارهای تجاری اجزای محدود با هدف پاسخ به نیازمندی‌ها علمی و صنعتی، طراحی و به بازار ارائه گردیدند. تعداد و تنوع این نرم‌افزارها امروزه به حدی رسیده است که کاربر نمی‌تواند به راحتی یکی را انتخاب کند. اگرچه قابلیت‌ها و توانمندی‌های این نرم‌افزارها متفاوت است، ولی در بسیاری از تحلیل‌ها این قابلیت‌ها مشابه و یکسان می‌باشد که می‌توان به نرم‌افزارهایی همچون ABAQUS، ANSYS، DIANA، COSMOS، NASTRAN و ASKA... اشاره کرد.

آباکوس یک مجموعه از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند می‌باشد که مبتنی بر روش اجزای محدود، قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان به‌صورت مجازی توسط این المان‌ها مدل کرد. همچنین دارای مدل‌های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن تقویت‌شده و همچنین مواد موجود در زمین، نظیر خاک و سنگ به کار برده می‌شود.

در این پایان‌نامه برای مدل‌سازی عددی نمونه آزمایشگاهی از نسخه‌ی ABAQUS V6.14 استفاده‌شده است. در این فصل به آشنایی با روش عددی، مدل‌سازی رفتار مصالح، طراحی و بررسی رفتار غیرخطی پیوستگی و شناخت المان‌ها در آباکوس پرداخته می‌شود.

۴-۲-حل عددی معادلات دیفرانسیل

مهندسان و فیزیکدان‌ها یک پدیده فیزیکی را به وسیله‌ی دستگاهی از معادلات دیفرانسیل معمولی که شرایط مرزی و آغازین مناسبی را تأمین می‌کند توصیف می‌کنند. در واقع یک معادله دیفرانسیل با شرایط مرزی و اولیه مورد نیاز خود یک مدل ریاضی کامل از یک پدیده است. برای یافتن توزیع متغیرهای مورد نظر که ارتباط آن‌ها در فرم دیفرانسیلی توسط معادله حاکم بیان می‌گردد، می‌بایست معادله مذکور حل گردد تا بتوان مقادیر عددی هر کمیت مرتبط را در نقاط دلخواه به دست آورد. اما با توجه به اینکه تنها می‌توان اشکال بسیار ساده این معادلات آن‌هم در ناحیه‌های هندسی بسیار ساده را با روش‌های تحلیلی حل نمود، در حل اغلب معادلات حاکم به روش تحلیلی با مشکل بزرگی مواجه گردیده است. برای مقابله با چنین مشکلاتی و نیز جهت استفاده از قدرتمندترین وسیله موجود در قرن حاضر یعنی کامپیوتر، ضروری است که مسئله موردنظر در یک قالب کاملاً جبری ریخته شود تا حل آن‌ها تنها نیازمند عملیات جبری باشد. برای دستیابی به چنین هدفی می‌توان از انواع مختلف روش‌های گسسته‌سازی یک مسئله یپیوسته تعریف شده به وسیله معادلات دیفرانسیل استفاده نمود. در این روش‌ها تابع و یا توابع مجهول که می‌توان آن‌ها را با مجموعه‌ای نامتناهی از اعداد نشان داد، به‌وسیله

تعداد متناهی از پارامترهای مجهول جایگزین می‌گردند که طبیعتاً در حالت کلی نوعی تقریب را در بردارد.

۴-۳- کلیات روش اجزای محدود

روش اجزای محدود یک دستورالعمل عددی جهت حل مسائل فیزیکی می‌باشد که توسط معادله دیفرانسیل توصیف می‌شوند. این روش دارای دو ویژگی است که آن را از سایر روش‌های عددی متمایز می‌سازد:

- در این روش از یک فرمول‌بندی انتگرالی جهت ایجاد یک دستگاه معادلات جبری استفاده می‌شود.
- در این روش از توابع هموار به طور قطعه‌ای پیوسته جهت تقریب کمیات مجهول استفاده می‌شود.

روش اجزای محدود را می‌توان به پنج مرحله اصلی تقسیم کرد:

۱- تقسیم ناحیه مورد بحث به تعداد زیادی زیر ناحیه‌ی کوچک موسوم به المان که نقاط اتصال المان‌ها به یکدیگر، گره نامیده می‌شود.

۲- تعیین تقریب اولیه برای حل به صورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول که یا خطی و یا مرتبه دوم است. پس از تعیین شدن مرتبه تقریب اولیه، معادله حاکم در هر گره نوشته می‌شود.

۳- استخراج دستگاه معادلات جبری. با انتگرال‌گیری، برای هر گره یک معادله جبری ایجاد می‌گردد که پس از استخراج معادلات همه گره‌ها، دستگاه معادلات به وجود می‌آید.

۴- حل دستگاه معادلات ایجادشده.

۵- محاسبه سایر کمیات از روی مقادیر گرهی.

۴-۴-مروری بر مفهوم تحلیل غیرخطی

به طور کلی غیر خطی شدن یک مسئله می‌تواند در دو شکل ظاهر شود [۴۰]:

الف- غیر خطی هندسی: این نوع غیر خطی بودن در برگیرنده‌ی تغییرات هندسه سازه بوده که در این نوع مسائل ماتریس سختی سازه [K] تابعی از بردار تغییر مکان‌ها [U] و مشتقات آن است.

ب- غیرخطی بودن ماده: این نوع مسائل ممکن است در اثر وجود یک رابطه‌ی غیرخطی بین تنش و کرنش مواد به وجود آید. در این مواد تنش تابعی غیرخطی از کرنش است. از مصادیق این نوع مواد بتن است. در سازه‌های بتن آرمه هر دو ماده‌ی بتن و فولاد رفتار کاملاً غیر خطی دارند. در نرم‌افزار ABAQUS انواع مختلفی از مواد غیرخطی قابل تعریف هستند. در بین این مواد، بتن به عنوان یک ماده‌ی غیرخطی، شناخته شده و می‌توان ماده‌ای را به نام فهرست مواد غیرخطی قابل تعریف هستند. در بین این مواد، بتن به عنوان یک ماده‌ی غیرخطی شناخته شده و می‌توان ماده‌ای را به نام بتن در فهرست مواد غیرخطی آن معرفی نمود.

در حل یک مسأله‌ی غیرخطی عوامل بسیار مهمی دخالت دارند به طوری که عدم دقت در وارد کردن و معرفی آن‌ها باعث می‌شود که نتایج کاملاً غلطی ارائه شود. از جمله‌ی این عوامل می‌توان به بارگذاری اشاره کرد؛ به طوری که تغییر در نحوه‌ی اعمال بار منجر به تغییر در روند حل و نتایج خواهد شد. باید به این نکته توجه کرد که میزان یا نحوه‌ی اعمال برخی از پارامترها برای هر مسئله متفاوت است. در حل یک مدل غیرخطی بتن آرمه واضح است این پارامترها باید متناسب با همان حل تنظیم گردند. لذا در بخش‌های بعدی منحصراً به مدل‌سازی غیرخطی پرداخته می‌شود.

۴-۵-جایگاه و اهمیت کالیبراسیون نمونه‌ها

زمانی که نمونه‌هایی را در آزمایشگاه ساخته و آن‌ها را آزمایش نموده، دسته‌ای از نتایج در اختیار قرار می‌گیرد. گرچه ممکن است بعضی از آن نتایج همراه با خطا باشد؛ لیکن کلیت این نتایج به عنوان مبنایی برای استخراج‌های بعدی مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرد. در مقابل، در یک تحلیل کامپیوتری

اولین سؤال اساسی در مواجهه با هر نتیجه‌ای آن است که چگونه و تا چه حد به صحت این نتیجه اطمینان است. در هر تحقیق برای آن که بتنوان نتایج تحلیل‌های رایانه‌ای خود را مبنایی برای نتیجه-گیری‌ها و مقایسه‌های بعدی قرار داد، لازم است ابتدا توانمندی خود را برای مدل‌سازی اثبات گردد. بهترین روند برای نیل به این هدف آن است که نمونه‌هایی از تحقیقات آزمایشگاهی (حتی تحلیلی) انجام شده توسط سایر محققین را انتخاب نموده و با روش یا نرم‌افزار مورد استفاده‌ی خود سعی در به دست آوردن نتایج مشابه می‌نماید [۴۰].

در پژوهش حاضر این امر کلی و مهم با دو پیچیدگی همراه شده است؛ اول آن که ماهیت مدل‌سازی ماده‌ای مانند بتن با وجود ترک‌خوردگی و ساختار حاکم بر شکست بتن از یک روند غیرخطی تبعیت می‌کند که امری پیچیده و حساس است. دوم آن‌که به نظر می‌رسد رفتار چندگانه‌ی بتن، فولاد و کامپوزیت را در کنار یکدیگر، به سختی و با رعایت نکات بسیار دقیقی می‌توان مدل‌سازی کرد. بنابراین وجود سرفصلی به منظور کالیبراسیون نمونه‌ها، در بین کارهای صورت گرفته در این تحقیق امری اجتناب ناپذیر است.

۴-۶- نکات قابل توجه در مدل‌سازی اجزای محدود یک عضو بتن آرمه

به منظور مدل نمودن عضو بتن‌آرمه، لازم است که هندسه‌ی مدل در نرم‌افزار شبیه‌سازی شود. در این مدل‌سازی موارد زیر باید رعایت گردد:

۱- ترک‌خوردگی و اثرات آن بر رفتار بتن تحت تنش کششی در نظر گرفته شود و در مواردی که بر بتن فشار محصورشدگی نیز اعمال گردیده، اثرات آن مدل گردد.

۲- با توجه به مشکلاتی که با در نظر گرفتن قابلیت خردشدگی بتن، در روند هم‌گرایی حل به وجود می‌آید. در این تحقیق از این قابلیت صرف نظر شده است [۴۱].

۳- با انتخاب المان و ماده‌ای با رفتار مناسب، افزایش مقاومت کششی و کرنش بتن در نمونه مدل گردیده است.

۴- از المان‌های مناسب برای در نظر گرفتن مصالح به کار رفته در ساخت نمونه، همچون بتن و

آرماتورهای موجود استفاده شود.

۵- مقاومت برشی حاصل از درگیری بین سنگ‌دانه‌های موجود در مقطع ترک‌خورده در نظر گرفته شود.

۶- در هر نوع مدل‌سازی از جمله مدل‌سازی اعضای بتن مسلح، باید با توجه به رفتار مورد انتظار از مدل، مدل‌های رفتاری و المان‌های کارا را پس از مطالعه‌ی دقیق راهنمای نرم‌افزار ABAQUS انتخاب نمود.

مجموعه‌ی فوق از نکات لازم و ضروری برای مدل نمودن رفتار هر سازه‌ای که متشکل از اعضای بتن مسلح است، می‌باشد. اهمیت هریک از موارد ذکر شده، در مدل‌سازی انواع اعضای بتن مسلح متفاوت است.

۴-۷- معرفی گزینه‌های المان‌ها در ABAQUS

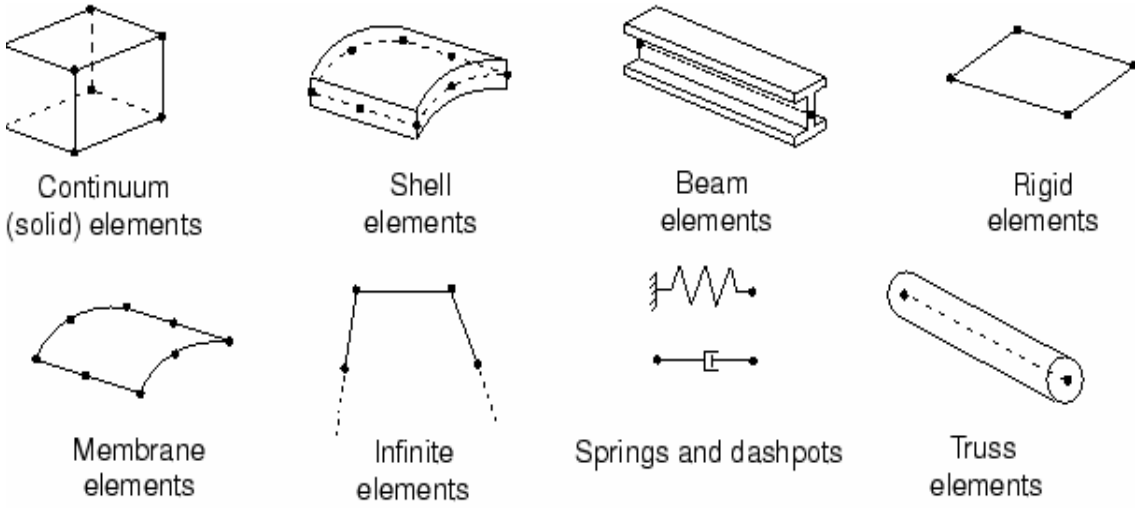
طیف وسیعی از المان‌ها در ABAQUS قابل‌استفاده است که ازاین‌جهت توانایی بسیار زیادی را به کاربر می‌دهد تا بتواند انواع مختلف مسائل را مدل‌سازی نموده و تحلیل نماید.

در این بخش با چهار ویژگی یک المان که رفتار آن را معین می‌سازد آشنا می‌شود.

- خانواده
- درجات آزادی
- تعداد گره‌ها
- روش فرمول‌بندی

۴-۷-۱- خانواده

در شکل زیر انواع خانواده‌های المان‌هایی که در مسائل تحلیل تنش کاربرد دارند را مشاهده می‌کنید.



شکل (۴-۱) خانواده المان‌ها

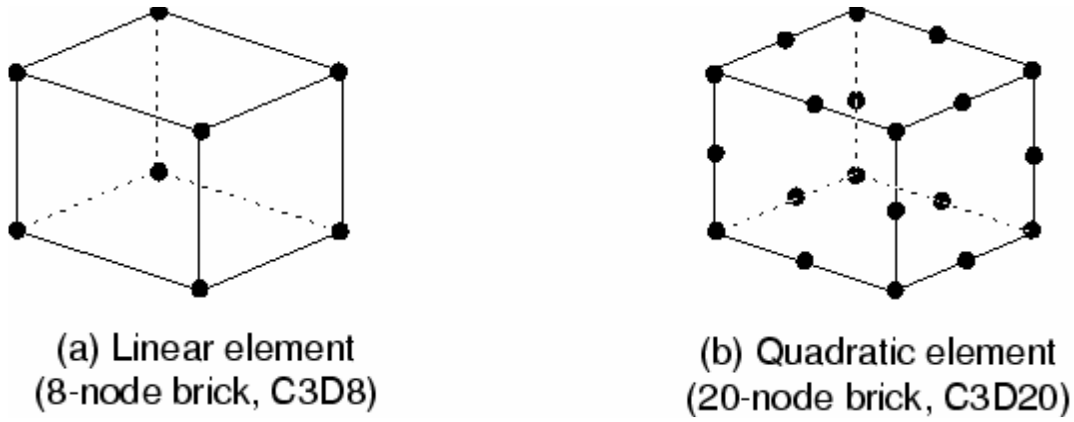
اولین حرف یا حروفی که در نام یک المان مشاهده می‌شود بیانگر خانواده آن المان است. برای مثال در المان S4R حرف S بیانگر این است که این المان از خانواده Shell می‌باشد و نیز در خصوص C3D8I حرف C بیانگر این است که این المان از خانواده Continuum می‌باشد.

۴-۷-۲- درجات آزادی

درجات آزادی در واقع متغیرهای اصلی می‌باشند که در هنگام تحلیل محاسبه می‌گردند. برای یک مدل‌سازی تنش- تغییر مکان، درجات آزادی اصلی، تغییر مکان‌های گره‌ها می‌باشند.

۴-۷-۳- تعداد گره‌ها و مرتبه درون‌یابی

به طور عمده مرتبه درون‌یابی از روی تعداد گره‌های یک المان تعیین می‌گردد. المان‌هایی که فقط در گوشه‌های خود دارای گره می‌باشند، مانند المان ۸ از درون‌یابی خطی در هر جهت استفاده می‌کنند و از این رو المان‌های خطی و یا مرتبه اول نامیده می‌شوند. المان‌هایی که دارای گره در وسط هر لبه خود می‌باشند، مانند المان نشان داده‌شده در شکل ۴-۲ از میان‌یابی سهموی ۱ (مرتبه دوم) استفاده می‌کنند و ازاین‌رو C3D20 المان‌های سهموی و یا مرتبه دوم نام‌گرفته‌اند.



شکل (۴-۲) المان های خطی و غیر خطی

۴-۷-۴- فرمول‌بندی

فرمول‌بندی یک المان به تئوری ریاضی تعیین رفتار المان بازمی‌گردد. همه‌ی المان‌های مورداستفاده در تحلیل‌های تنش- تغییر مکان از فرمول‌بندی لاگرانژی یا جرم کنترل استفاده می‌کنند. در این نوع فرمول‌بندی ماده داخل المان تا انتهای تحلیل داخل المان باقی می‌ماند و نمی‌تواند از مرز المان خارج شود. در حالت مقابل فرمول‌بندی اویلری یا دیدگاه حجم کنترل وجود دارد که در آن المان در فضا ثابت است و ماده از داخل آن جریان پیدا می‌کند.

۴-۸-مدل‌سازی رفتار مصالح در آباکوس:

در ادامه به اصول کلی مدل‌سازی مصالح که همان بتن و فولاد می‌باشند، پرداخته می‌شود.

۴-۸-۱- بتن

در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن از مدل آسیب‌دیدگی[۱] در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است.

در نرم‌افزار ABAQUS برای در نظر گرفتن خرابی مصالح سه نوع ترک‌خوردگی قابل مدل‌سازی است که باید در بخش خواص مصالح تعریف شود [۴۲].

- مدل‌سازی ترک‌خوردگی بتن با Smeared crack concrete model

۱ . Concrete Damage Plasticity

- مدل‌سازی ترک‌خوردگی بتن با Brittle crack concrete model
- مدل‌سازی ترک‌خوردگی بتن با Concrete damage plasticity model

در این پایان‌نامه به‌منظور شبیه‌سازی رفتار بتن از مدل آسیب‌دیدگی پلاستیک بهره گرفته‌شده است.

۴-۸-۱-۱- پارامتر (f)

این پارامتر مشخصات تابع گسیختگی را بیان کرده و توسط f_{b0}/f_{c0} f_{bo}/f_{co} یا همان نسبت مقاومت فشاری دو محوره‌ی بتن به مقاومت فشاری تک محوره تعریف می‌شود. اغلب منابع مقدار ۱,۱۶ و ۱,۲۵ را وابسته به مقاومت بتن و درجه محصورشدگی معرفی کرده‌اند. در این پژوهش از مقدار ۱,۱۶ برای نسبت f_{b0}/f_{c0} استفاده شده است.

۴-۸-۱-۲- زاویه اتساع (Ψ)

زاویه اتساع کرنش پلاستیک براثر برش را در فاز بعد از الاستیک تعریف می‌نماید. هنگامی‌که $\Psi=0$ باشد ماده هیچ‌گونه تغییر حجم کرنشی ندارد [۴۲]. با توجه به آزمایش‌ها، مشخص‌شده است که برای بتن مسلح زاویه اتساع بین ۲۰ تا ۴۰ درجه خواهد بود [۴۳]. هرچه مقدار این زاویه کوچک‌تر باشد رفتار مصالح ترد و هرچه این زاویه بزرگ‌تر باشد ماده از خود رفتاری مانند مواد شکل‌پذیر نشان می‌دهد [۴۴]. در این پایان‌نامه از زاویه‌ی اتساع ۳۱ بهره گرفته‌شده است.

۴-۸-۱-۳- پارامتر (γ)

این پارامتر شکل صفحه تنش و همین‌طور زاویه محصورشدگی بتن را تعریف می‌کند. صفحه گسیختگی بتن در مختصات سه‌بعدی تنش اصلی، برای تنش‌های کم، یک سطح مقطع مثلثی دارد و در شرایط تنش هیدرو استاتیکی بالا به شکل دایروی می‌باشد [۴۵]. به‌عبارت‌دیگر هنگامی‌که صفحه انحراف به شکل مثلثی نزدیک باشد، درجه محصورشدگی کمتر و هنگامی دایره‌ای شکل باشد درجه محصورشدگی زیاد را در نظر می‌گیرند [۴۲]. این پارامتر از روابط زیر به دست می‌آید که در آن J_2 نامتغیر دوم تانسور تنش انحرافی برای کشش و فشار نصف‌النهاری می‌باشد. پارامتر γ رابین ۰,۶۶۶ و ۱

تعریف کرده‌اند که در این تحقیق مقدار ۰٫۶۶۷ منظور شده است.

$$\gamma = \frac{3(1-\rho)}{2\rho+3} \qquad (۱-۴)$$

$$\rho = \frac{(\sqrt{J_2})_{TM}}{(\sqrt{J_2})_{CM}} \qquad (۲-۴)$$

۴-۸-۱-۴- پارامتر ویسکوزیته (η)

در نظر گرفتن پارامتر ویسکوزیته باعث می‌شود که حساسیت نسبت به سطح تسلیم کمتر شود و درنتیجه مشکلات همگرایی تا حدودی بهبود یابد. طبیعی است که این مقدار باید به حدی کوچک باشد که بتوان از تأثیرات آن بر پاسخ کلی سازه جلوگیری کرد. در این پایان‌نامه برای رسیدن به همگرایی مطلوب از ویسکوزیته ۰٫۰۰۰۱ استفاده شده است.

۴-۸-۱-۵- خروج از مرکزیت (ϵ)

در مدل خرابی پلاستیک بتن، سطح پتانسیل پلاستیک در صفحه نصف‌النهاری به فرم یک هذلولی می‌باشد. این شکل از طریق برون محوریت یا خروج از مرکزیت پتانسیل پلاستیک تنظیم می‌گردد. خروج از مرکزیت پتانسیل پلاستیک، درواقع نرخ نزدیک شدن هذلولی پتانسیل پلاستیک به مجانبش می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر طول قطعه‌ای که رأس هذلولی و مجانب هذلولی را قطع می‌نماید پارامتر برون محوریت نام می‌گیرد. مدل خرابی پلاستیک در آباکوس، به‌طور پیش‌فرض مقدار ۰٫۱ را در نظر می‌گیرد [۴۲]. در این تحقیق نیز میزان برون محوریت همان ۰٫۱ در نظر گرفته شده است.

۴-۸-۱-۶- نمودار تنش-کرنش کششی بتن

نمودار تنش-کرنش کششی بتن مانند شکل ۴-۳ با استفاده از روابط پس از خرابی بتن در معرض کشش به‌دست می‌آید. این روابط با درنظر گیری سخت‌شوندگی کششی، نرم‌شوندگی کششی و اندرکنش بین

آرماتورها و بتون پیشنهاد شده‌اند. برای تعیین این نمودار بایستی پارامترهای σ_t، $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ و d_t را که به ترتیب بیانگر مدول الاستیسیته، مقاومت کششی، کرنش شکست و پارامتر خرابی می‌باشد را مشخص کرد. کرنش شکست از رابطه ۴-۳ بدست می‌آید:

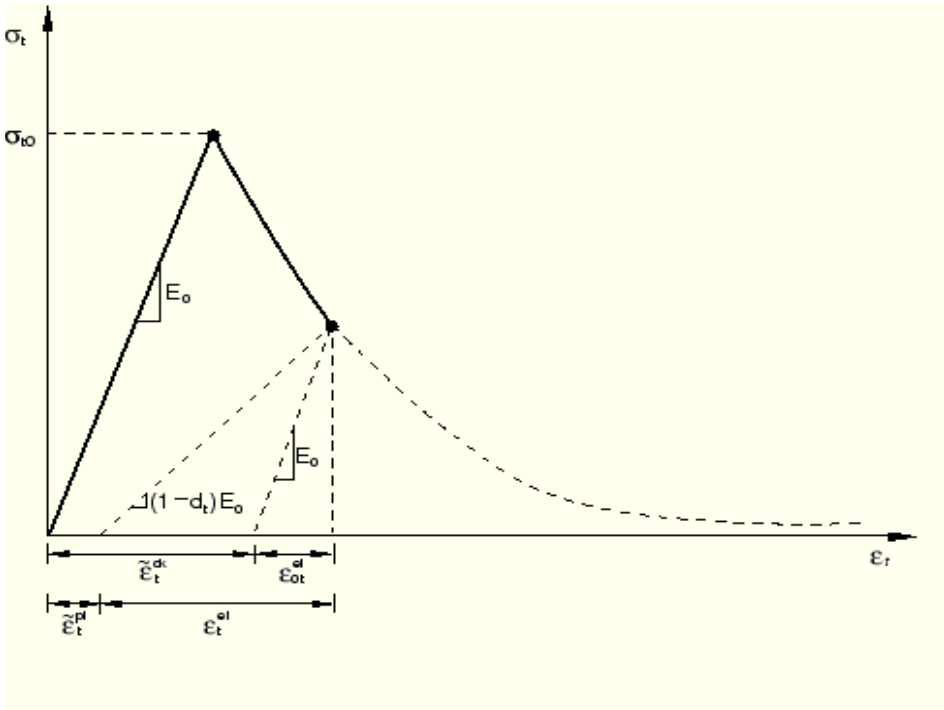
$$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{ot}^{el} \qquad (۳-۴)$$

در این رابطه $\varepsilon_{ot}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_0}$ نشان دهنده‌ی کرنش الاستیک مصالح آسیب ندیده و ε_t کرنش کلی کششی می‌باشد.

نرم افزار آباکوس دقت نمودار تنش-کرنش کششی را با استفاده از مقدار کرنش پلاستیک، که از رابطه ۴-۴ بدست می‌آید، بررسی می‌کند. مقدار منفی و یا نزولی کرنش پلاستیک نشان دهنده‌ی نادرست بودن نمودار تنش-کرنش می‌باشد و باعث ایجاد خطا در تحلیل می‌شود[۴۳].

$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{1-d_t} \cdot \frac{\sigma_t}{E_0} \qquad (۴-۴)$$

پارامتر خرابی کششی (d_t)، برابر با نسبت کرنش شکست ($\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$) وکرنش کلی ($\varepsilon_t$) می‌باشد. این مقدار برای مصالح کاملاً سالم برابر صفر و برای مصالح کاملاً آسیب دیده برابر یک می باشد.



شکل (۴-۳) نمودار تنش-کرنش کششی بتن برای مدل خسارت پلاستیک [۴۳].

۴-۸-۱-۷- نمودار تنش-کرنش فشاری بتن

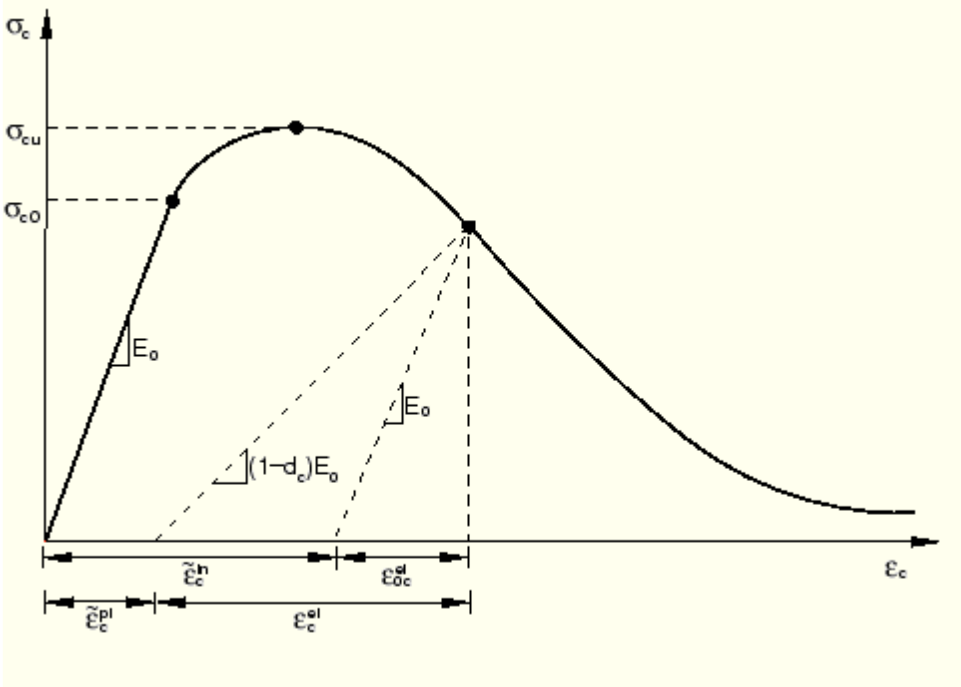
نمودار تنش کرنش فشاری بتن مانند شکل ۴-۴ با استفاده از روابط پس از خرابی بتنی که در معرض فشار تک محوری قرار گرفته است، محاسبه می‌گردد. برای استفاده از این روابط ابتدا بایستی پارامترهای σ_c، $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$ و d_c را که به ترتیب بیانگر حداکثر تنش فشاری، مقاومت کششی، کرنش غیر الاستیک و پارامتر خرابی بتن می باشد را مشخص کرد. کرنش غیر الاستیک از رابطه‌ی ۴-۵ بدست می‌آید:

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{oc}^{el} \qquad (۴-۵)$$

در این رابطه $\varepsilon_{oc}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0}$ نشان دهنده‌ی کرنش الاستیک مصالح آسیب ندیده و ε_c کرنش کلی الاستیک می باشد. علاوه بر این برای اطمینان از صحت نمودار تنش-کرنش فشاری بتن، کرنش پلاستیک که از رابطه ۴-۶ محاسبه می شود، نبایستی مقدار منفی و یا نزولی داشته باشد.

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} \cdot \frac{\sigma_c}{E_0} \qquad (۶-۴)$$

پارامتر خرابی فشاری (d_c) برابر با نسبت کرنش غیرالاستیک ($\tilde{\varepsilon}_c^{in}$) به کرنش فشاری کلی ($\varepsilon_c$) می باشد. این مقدار برای مصالح کاملاً سالم برابر صفر و برای مصالح کاملاً آسیب دیده برابر یک می‌باشد. پس از محاسبه مقادیر معرفی شده برای پارامترهای خسارت پلاستیک بتن این اعداد را جهت وارد کردن به نرم افزار برای هر مدل به صورت جداگانه محاسبه کرده و به آن اختصاص گردید.



شکل (۴-۴) نمودار تنش-کرنش فشاری بتن برای مدل خسارت پلاستیک [۴۳]

۴-۸-۲- فولاد

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی رفتار آرماتورها، از مصالح با دو مدل رفتاری استفاده شده است:

۱- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):

این مدل رفتاری دارای دو پارامتر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشد. این مدل برای شبیه-سازی رفتار فولاد در ابتدای بارگذاری به کار می‌رود.

در این مدل رفتاری می‌بایست مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فولاد مصرفی وارد شود.

۲- ایزوتروپیک دوخطی (Bilinear Isotropic Hardening Plasticity):

این مدل (**BISO**) با تعیین منحنی تنش-کرنش فولاد، به منظور شبیه‌سازی رفتار فولاد در طول بارگذاری به کار می‌رود.

در این مدل رفتاری می‌بایست، تنش تسلیم فولاد و شیب منحنی تنش-کرنش، پس از نقطه‌ی تسلیم وارد می‌شود. این مدل رفتاری قادر به پیش‌بینی سخت‌شدگی و نرم‌شدگی فولاد نمی‌باشد.

در مواردی که مدل‌سازی سخت‌شدگی فولاد و یا حتی نرم‌شدگی آن مد نظر باشد می‌بایست از مدل‌های رفتاری (**MISO**) به جای ایزوتروپیک دوخطی (**BISO**) استفاده کرد.

۴-۹- مدل‌سازی صفحات بارگذاری و تکیه‌گاه در ABAQUS

در این تحقیق ، به منظور شبیه‌سازی رفتار صفحات بارگذاری، از یک مصالح یا مدل رفتاری استفاده شده است.

ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):

این مدل رفتاری دارای دو پارامتر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشد. وجود این مدل برای شبیه‌سازی رفتار این صفحات در ابتدای بارگذاری ضروری است. وجود همین یک مدل رفتاری به منزله‌ی یکسان بودن رفتار مصالح در تمام طول تحلیل می‌باشد. در وارد کردن این مدل‌رفتاری برای صفحات بارگذاری، می‌بایست دو نکته‌ی مهم زیر مد نظر قرار گیرد.

با توجه به صلبیت نسبی صفحات بارگذاری و تکیه‌گاه در آزمایشگاه، مدول الاستیسیته‌ی آن طوری تعیین شود که منعکس کننده‌ی صلبیت آن در مقایسه با بتن باشد.

به منظور سازگاری مناسب این صفحات با بتن، ضریب پواسون آن‌ها برابر یا نزدیک با ضریب پواسون بتن در نظر گرفته شود.

۴-۱۰- نحوه‌ی مدلسازی یک عضو بتن‌آرمه در ABAQUS

مدل سازی یک عضو یعنی تعیین و تطبیق مشخصات عضو، اعم از رفتار مادی، مشخصات هندسی، شرایط مرزی و نحوه‌ی بارگذاری، به گونه ای که عکس‌العمل رفتاری و خروجی‌هایی متناسب و نزدیک به نتایج واقعی از آن حاصل شود. اطمینان از نزدیک شدن نتایج خروجی با نتایج آزمایشگاهی که با تعدیل پارامترهای قابل تنظیم در نرم‌افزار همانند ضرایب انتقال برش در ترک‌های باز و بسته صورت می گیرد، تعیین صحت عملکرد یا همان کالیبراسیون نامیده می شود. آنچه که نقشی اساسی در این مدل‌سازی دارد، معادل سازی رفتار غیرخطی عضو مورد نظر در نرم افزار با مدل های ریاضی موجود در شرایط تحلیل غیرخطی و رفتار پیوستگی آن می باشد.

به طور کلی برای مدل‌سازی هر عضو در نرم‌افزار ABAQUS مراحل زیر باید مد نظر قرار گرفته و به طور مشخص تعریف گردد:

۱- ترسیم شکل هندسی عضو با توجه به ابعاد نمونه و در نظرگیری سیستم واحدی یکسان و استفاده از دستگاه مختصات محلی و کلی مناسب با توجه به هندسه‌ی عضو. در المان بتن آرمه خصوصیات المان مشتمل بر زوایا و جهت‌های مربوط به قرارگیری آرماتورها و جهت‌های ترک‌خوردگی در المان بر اساس دستگاه مختصات محلی تعریف شده، برای آن المان سنجیده می‌شود. در نرم افزار ABAQUS برای تعیین دستگاه مختصات محلی از دستگاه مختصات کلی (اصلی) که دارای مبدأ ثابتی بوده و همه چیز در یک مدل‌سازی نسبت به آن سنجیده می شود، استفاده می گردد. به طور کلی این نرم افزار شامل سه نوع دستگاه مختصات کلی، دکارتی، استوانه ای و کروی می باشد.

۲- در نظرگیری المان های متناسب با رفتار عضو سازه‌ای مورد نظر و تنظیم مشخصات اصلی در گزینه‌ی FEATURE مربوط به آن المان.

۳- بیان خصوصیات و رفتار مکانیکی مواد و مصالح استفاده شده در عضو در گزینه‌ی PROPERTY که این قسمت متشکل از دو بخش می باشد:

الف- با توجه به نوع المان و رفتار ماده خصوصیاتی ویژه برای المان های گوناگون قابل تعریف می باشد که تحت عنوان ثابت های حقیقی در قسمت GENERAL مربوط به آن المان تعریف میگردد. در این بخش سختی، ضرایب پواسون و چگالی مواد مورد استفاده تعریف می‌گردد.

ب- برای تعیین خواص مکانیکی مواد، قسمت MECHANICAL یکی از مهم‌ترین بخش‌های تعیین خواص مصالح می‌باشد. اگر در تعیین این خواص کوچکترین نقصی پیش آید، جواب‌های بدست آمده برای تحلیل صورت پذیرفته از طریق نرم‌افزار فاصله بسیار زیادی نسبت به جواب‌های تحلیل دستی خواهد داشت. مواد دارای دو فاز الاستیک و پلاستیک می‌باشند. در صورتی که بارهای اعمالی کم باشند، ماده فقط در فاز الاستیک عمل می‌کند و چنانچه بارهای اعمالی زیادتر از حد الاستیک وارد شوند بخشی از ماده پلاستیک می‌شود.

۴- با توجه به نوع المان و رفتار تعریف شده‌ی مادی قبلی، با ایجاد SECTION خواص در نظر گرفته شده را به المان اختصاص می‌دهیم، که بر دو نوع مواد همسانگرد و غیرهمسانگرد می باشد. چنانچه رفتار یک ماده در تمام جهات یکسان باشد، آن ماده همسانگرد و چنانچه در هر جهتی دارای رفتار مادی متفاوت می‌باشد آن ماده غیرهمسانگرد نامیده می‌شود. باید دقت نمود که لغت همسانگرد با لغت همگن که به معنی یکسان بودن خصوصیات مادی در تمام نقاط یک ماده می باشد، اشتباه نگردد.

۵- وقتی قطعه‌ای ساخته می‌شود، این قطعه در مختصات محلی می‌باشد و برای این‌که در مدل اصلی در کنار قطعات دیگر قرار گیرد، لازم است تمامی قطعات از مختصات محلی به مختصات واحدی به نام مختصات کلی بروند تا بتوانند وارد عمل شده و شکل نهایی مدل را بسازند. در هنگام مونتاژ دو نوع نمونه DEPENDENT و INDEPENDENT برای انتخاب در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.

نمونه DEPENDENT زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که قرار باشد مش‌بندی در هر قطعه به صورت جداگانه تولید شود. ولی نمونه INDEPENDENT زمانی به کار می‌رود که قرار باشد مش‌بندی روی

همه‌ی قطعات موجود در یک مونتاژ با یکدیگر تولید شوند. تفاوت دیگری که می‌توان اشاره کرد این است که در نمونه INDEPENDENT اجازه پارتیشن‌بندی به کاربر داده می‌شود.

۶- پس از آنکه مراحل ساخت نمونه قطعات مدل در ماژول PART و اختصاص مصالح در ماژول PROPERTY و مونتاژ قطعات در ماژول ASSEMBLY به پایان رسید، کاربر برای تخصیص نوع تحلیل مورد نیاز که شامل استا تیکی، دینامیکی، گذرا و .... بوده و تنظیم پارامترهای قابل تعریف برای تحلیل اجزای محدود و اجرای تحلیل و همچنین تعریف خروجی‌های حاصل از تحلیل به ماژول STEP مراجعه می‌گردد.

۷- جهت تعریف تماس های بین سطوح به ماژول INTRACTION مراجعه نموده. نکته قابل توجه در این اندرکنش‌ها این است که وابسته به تحلیل می باشند، یعنی می توان تعیین کرد که در یک مرحله‌ی تحلیل یک اندرکنش فعال و یا غیر فعال باشد.

۸- اعمال بارگذاری مورد نظر بر روی عضو؛ این بار گذاری شامل تخصیص شرایط مرزی اعم از قیود گیرداری گره‌ها، شرایط تقارن و پادتقارن و یا اعمال نیروهای متمرکز گره‌ای، سطحی و یا حجمی و یا تغییر مکان‌های مربوط به هر گره، می‌باشد.

تعیین پارامترهای مربوط به معیار همگرایی تحلیل غیرخطی که بیشتر با استفاده از معیارهای کنترل نیرو جابجایی لنگر و داوران و با توجه به نوع بارگذاری، اعمال می گردند. پس از آن حداکثر تعداد تکرار تا دستیابی به همگرایی تعیین شده مشخص می‌گردند.

به منظور در نظر گرفتن بارگذاری تدریجی یا نموی، تعداد گامهای اعمال بار برای رسیدن به بار حداکثر اعمال شده بر عضو، تعریف می‌گردد. به طور کلی در تحلیل غیرخطی اجزای محدود یک مدل، قابلیت در نظرگیری روند تدریجی بارگذاری وجود دارد و در هر مرحله، روند محاسبات به صورت محسوس تا آنجایی که معیار همگرایی تعریف شده برای نرم افزار تأمین گردد، تکرار می‌شود.

۹- مش‌بندی المان‌های ساخته‌شده با استفاده از ماژول MESH.

۱۰- کنترل نتایج خروجی حاصل از تحلیل در پردازشگرها و کالیبره نمودن نرم افزار با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود.

پس از بیان مختصری از مراحل مدل‌سازی اجزای محدود یک عضو در نرم‌افزار ABAQUS به مدل‌سازی نمونه‌های بررسی شده پرداخته می‌شود.

فصل پنجم

صحت‌سنجی مدل عددی

۵-۱-مقدمه

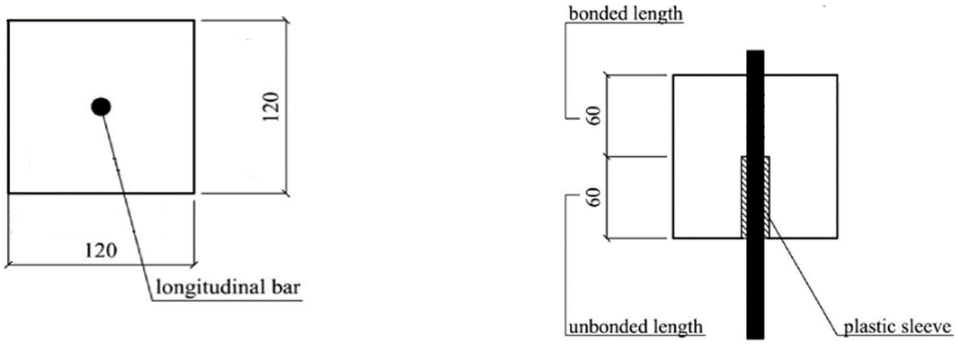
همیشه راستی آزمایی کارهای آزمایشگاهی توسط مدل‌های رفتاری و فرمول‌های تحلیلی انجام می‌شود تا اعتبار کار آزمایشگاهی و صحت آن سنجیده شود. یکی از راهکارهای مناسب در این راستا کمک گرفتن از برنامه‌ها و نرم افزارهای مهندسی است که در واقع مدل‌های تحلیلی بسیار پیچیده‌ای را در خود دارند و از آن‌ها برای مدل‌سازی و گرفتن نتایج مطلوب استفاده می‌شود. برای بررسی رفتار پیوستگی آرماتور و بتن با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های بیرون کشیدگی و خمشی سه نقطه ای عضو بتن مسلح، به مدل‌سازی نمونه های این آزمایش‌ها با کمک یکی از نرم افزار های قوی مهندسی به نام ABAQUS V6.14.1 پرداخته شد و با لحاظ رفتار مدل آسیب دیده‌ی بتن، نتایج تحلیل عددی رفتار پیوستگی آماتور و بتن بررسی گردید.

۵-۲-تحلیل اجزای محدود آزمایش بیرون‌کشیدن آرماتور از بتن

رفتار اعضای سازه‌ای بتن مسلح هنگامی که تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرند وابسته به عوامل مختلفی است که یکی از موثرترین آن‌ها، میزان هماهنگی در تغییر شکل‌های بتن و آرماتورها است. در این قسمت به مدل‌سازی و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش بیرون‌کشیدگی پرداخته شده است.

۵-۲-۱- مدل‌سازی

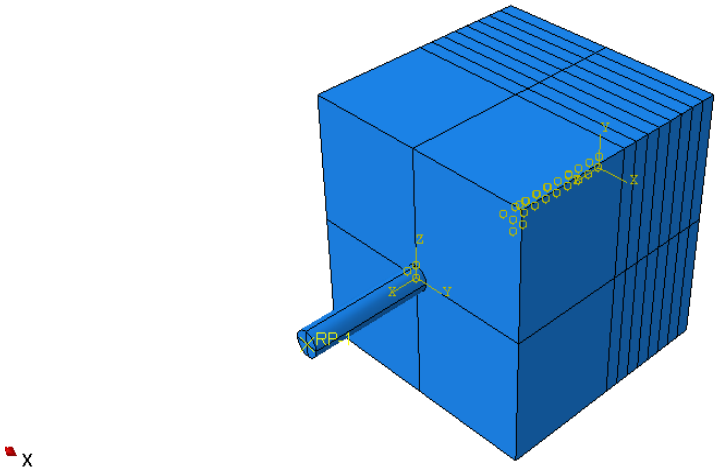
به منظور بررسی رفتار پیوستگی بین بتن و آرماتور، بر عملکرد سازه‌های بتن مسلح تحت اثر خوردگی، از نتایج آزمایش انجام شده توسط تاندلو استفاده شده است [۳۵]. مشخصات نمونه‌های استفاده شده در آزمایش تاندلو در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. در این مدل تیر بتنی با مقطع مستطیلی به ابعاد ۱۲۰*۱۲۰*۱۲۰ میلی‌متر بدون میلگرد عرضی و اعمال بار به صورت کنترل تغییر مکان مشابه با کار آزمایشگاهی مدل‌سازی شده است تا اثر اینرسی در طول زمان تحلیل، قابل چشم‌پوشی باقی بماند.



شکل (۵-۱) جزئیات هندسه ی نمونه ی آزماش تاندلو [۳۵]

برای مدل‌سازی نمونه‌های بتنی و فولادی از المان سه بعدی و ۸ گرهی همگن C3D8R در مدل‌سازی استفاده شده است.

ابتدا آرماتور φ۱۲ مورد نظر به صورت دقیق در داخل نمونه‌ی بتنی سوراخ شده جایگذاری گردید و به صورت مماس با آن در آمد. همچنین مدل ساخته شده جهت مش‌بندی بهتر به صورت پارتیشن‌هایی به قطعات کوچکتر تبدیل گردید (شکل ۵-۲).



شکل (۵-۲) نمونه‌ی مدل‌سازی شده در ABAQUS

۵-۲-۲- خواص مواد

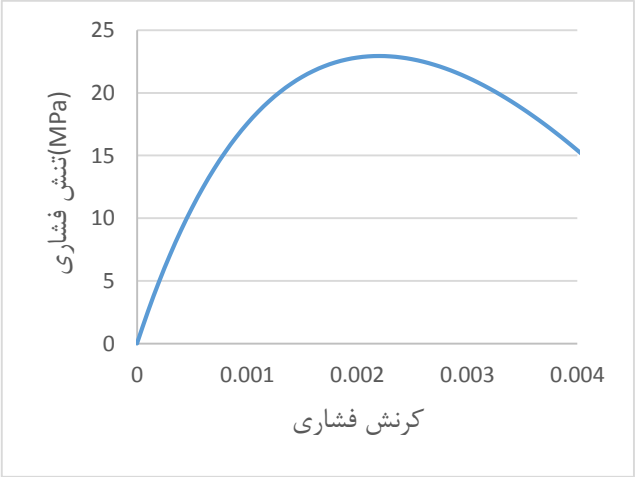
مشخصات مصالح برای آرماتور و بتن در جدول ۵-۱ و ۵-۲ به ترتیب نشان داده شده است. همچنین نمودارهای تنش-کرنش فشاری و کششی به صورت دقیق مطابق شکل ۵-۳ و ۵-۴ به ترتیب طبق آیین نامه‌ی بتن اروپا و مدل سخت‌شوندگی کششی واهالانتری[۱] ارائه شده و برای ترک خوردگی بتن و رسیدن به مرحله‌ی پلاستیک از مدل آسیب دیده‌ی بتن استفاده شده است.

جدول (۵-۱) مشخصات آرماتور در آزمایش بیرون‌کشیدگی

ضریب پواسون	وزن مخصوص (N/mm^3)	مدول یانگ (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
۰,۳	۷,۷*۱۰$^{-۶}$	۲*۱۰^{۵}	۴۵۰

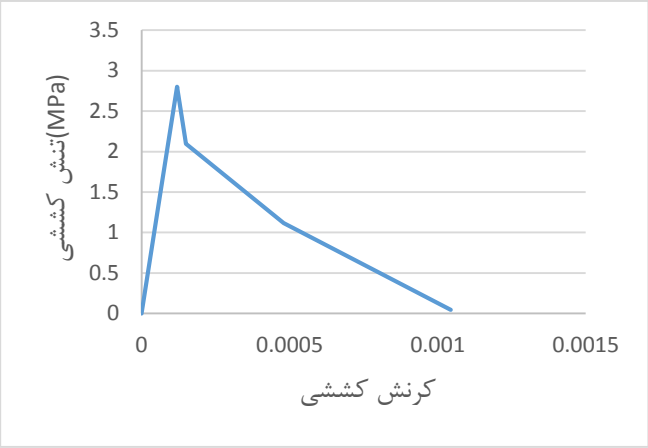
جدول (۵-۲) مشخصات بتن در آزمایش بیرون‌کشیدگی

ضریب پواسون	وزن مخصوص (N/mm^3)	مدول یانگ(MPa)	بیشینه تنش کششی (MPa)	بیشینه تنش فشاری (MPa)
۰,۲	۲,۴*۱۰$^{-۶}$	۲,۴۶*۱۰^{۴}	۳,۴	۳۰,۹



شکل (۵–۳) منحنی تنش-کرنش فشاری بتن توسط آیین نامه بتن اروپا

۱ . Wahalathantri

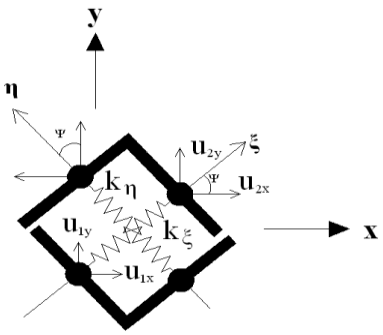


شکل (۵-۴) مدل سخت‌شوندگی کششی Wahalathantri [۴۶]

۵-۲-۳- اندرکنش

جهت تعریف اندرکنش بین آرماتور و بتن در آزمایش بیرون کشیدگی آرماتور، روش‌های گوناگونی مانند اعمال ضریب اصطکاک بین آرماتور ساده و بتن، مدفون کردن آرماتور در بتن، اعمال یک لایه با خصوصیات چسب با ضخامت نزدیک به صفر بین آرماتور و بتن و همچنین استفاده از فنرهای غیر خطی و ... وجود دارد.

در این پژوهش از المان Bond-Link جهت اتصال آرماتور سه بعدی به المان‌های بتن اطرافش به صورت نقطه به نقطه استفاده می‌شود. المان Bond-link شامل دو فنر موازی با محورهای عمود برهم می‌باشد. این المان از نظر مفهومی از دو فنر غیر خطی تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۵ مشاهده می‌گردد، نحوه‌ی قرارگیری این فنرها به گونه‌ای است که نسبت به یک مختصات، یکی موازی با محور آرماتور و دیگری عمود بر آن است. ψ زاویه بین مختصات دو محور ξ و η با مختصات کلی می‌باشد.



شکل (۵-۵) المان Bond-link [۴۷]

المان رابط، رفتار لایه‌ی بین فولاد و بتن را توصیف نموده و در صورتی که یک محدوده‌ی تغییر مکانی خطی یا مرتبه بالاتر در طرح جداسازی استفاده گردد، این المان یک اتصال پیوسته بین المان فولاد و بتن اطرافش در نظر می‌گیرد. ماتریس سختی المان، نیروی برشی و عمودی را به کمک رابطه‌ی ۵-۱ به تغییر مکان‌های گره‌ای نظیر مرتبط می‌سازد:

$$\begin{pmatrix} F_\xi \\ F_\eta \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_\xi & 0 \\ 0 & K_\eta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d_\xi \\ d_\eta \end{pmatrix} \qquad ۵-۱$$

در این رابطه K_ξ نشان دهنده‌ی سختی ناشی از اثر شکافتگی شعاعی (زبانه‌ای) بوده و در صورتی که در محاسبات در نظر گرفته شود، باید مقدار ناچیزی به آن اختصاص داده شود.

K_η سختی برشی المان رابط است و برابر با:

$$K_\eta = E_{b1} \cdot A \qquad ۵-۲$$

E_{b1} مدول لغزش اولیه می‌باشد و هنگامی که لغزش- پیوستگی d_η، از مقدار $d_{\eta 1}$ تجاوز کند، مقدار E_{b2} جایگزین آن می‌شود (E_{b2} مدول لغزش در حالت پلاستیک است). A سطح دایروی تماس آرماتور با یک المان پیوستگی رابط است، که از رابطه‌ی ۵-۳ بدست می‌آید:

$$A = \frac{m\pi d_b L}{4b} \qquad ۵-۳$$

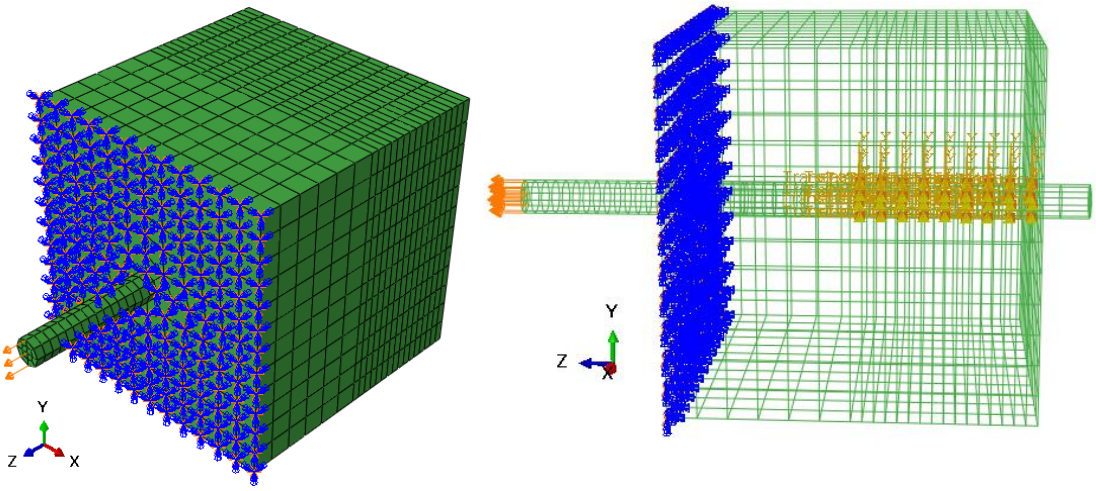
که m تعداد آرماتورهای با قطر d_b در سطح مقطع عضو، L فاصله‌ی رابط‌های پیوستگی در طول آرماتور و b فاصله‌ی فنرها در طول عضو است. ضریب ۴ موجود در مخرج کسر به این دلیل است که

معمولا برای نزدیکی رفتار مدل به حالت آزمایشگاهی، فنرها در هر چهار وجه المان فولاد قرار داده می‌شود. اگر از یک فنر در طول پیوستگی استفاده شود تمام نیرو به یک گره وارد می‌شود، که در آن محل تنش بسیار زیاد و در گره‌های مجاورش تنش کم می‌شود و عدم پیوستگی در نتایج به‌وجود می‌آید. بنابراین لغزش آرماتور در بتن در طول مدت بارگذاری مهم‌ترین پارامتر در بیان رفتار پیوستگی می‌باشد. جهت مدل‌سازی المان Bond-link، از اتصال نوع Translator در راستای افقی (اعمال نیروی بیرون کشیدگی) استفاده شده است. این اتصال برای مدل‌سازی رفتارهای ارتجاعی و میرایی و همچنین تماس‌های نقطه به نقطه استفاده می‌شود که طی آن جابه‌جایی نسبی در راستای خط جداکننده دو گره اتفاق می‌افتد. با استفاده از این نوع فنرهای غیر خطی می‌توان تمام خصوصیات پیوستگی بین آرماتور و بتن مانند: تاثیر آج آرماتور، چسبندگی، سنگدانه ریز و درشت و بسیاری از خواص آن را توسط این فنرها شبیه سازی کرد. در مدل‌سازی نمونه از ۳۶ عدد Translator مطابق شکل ۵-۶ در طول پیوستگی استفاده شده است. همچنین در ناحیه‌ای که نیاز به پوشش پلاستیکی است از المان Contact استفاده شده است. اندرکنش تماس (Contact) می‌تواند رفتار تماسی (اصطکاک و لغزش الاستیک) و رفتار نرمال (سخت، نرم، تماس با استهلاک و جداشدنی) را تعیین نماید. خاصیت اندرکنش تماس می‌تواند به‌صورت تماس عمومی، تماس سطح به سطح یا خود تماسی باشد. در تماس سطح به سطح تماس بین دو سطح تغییر شکل‌پذیر و یا بین یک سطح تغییر شکل‌پذیر و یک سطح صلب را تعریف کرد. در این پژوهش برای جلوگیری از تمرکز تنش و کوتاه کردن طول پیوستگی در حالت بدون اصطکاک (Frictionless) استفاده شده است.

۵-۲-۴- بارگذاری و تحلیل

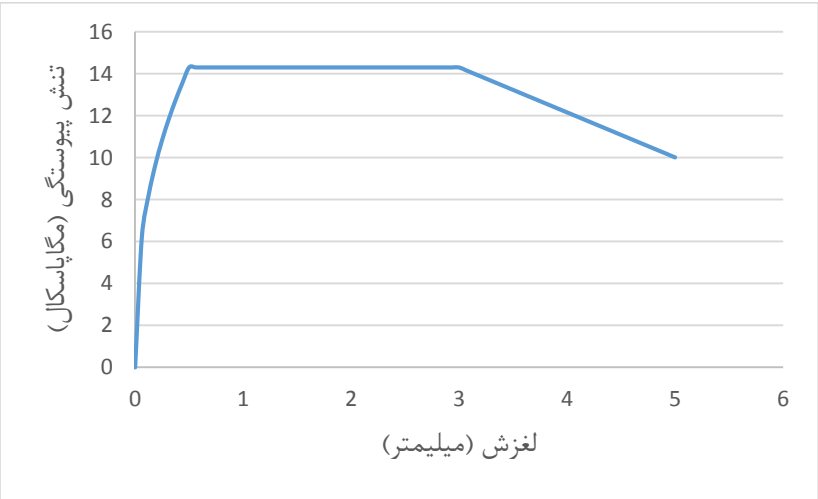
نوع تحلیل را با توجه به این که بار از نوع استاتیکی است، ولی به دلیل رفتار ترد و غیر خطی مصالح، تحلیل با استفاده از تحلیل‌گر دینامیکی صریح (Dynamic Explicit) به صورت شبه استاتیک انجام شده است. سرعت بارگذاری دینامیکی را بر روی ۰٫۱ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردیده است تا نسبت انرژی

جنبشی به انرژی پتانسیل از حد مجاز بیشتر نشود. جهت تعیین خروجی‌های مورد نظر از قبیل نیروی عکس العمل سطح آرماتور (که با تقسیم بر سطح تماسی پیوستگی، میزان تنش پیوستگی حاصل می‌شود) و همچنین جابه‌جایی سر آرماتور، از یک Set در نرم‌افزار استفاده شده است. سپس به اعمال بارگذاری و شرایط مرزی (تکیه‌گاهی) طبق شرایط آزمایشگاهی پرداخته شد. بارگذاری انجام شده به صورت بیرون کشیدگی و در اثر اعمال جابه‌جایی به سطح سر آرماتور مطابق شکل ۵-۶ به میزان ۵ میلی‌متر صورت گرفت. همچنین سطح ابتدای بتن به عنوان گیرداری کامل تعریف شده است.



شکل (۵-۶) نحوه قرار گیری فنرها و اعمال شرایط مرزی و مش بندی در نمونه

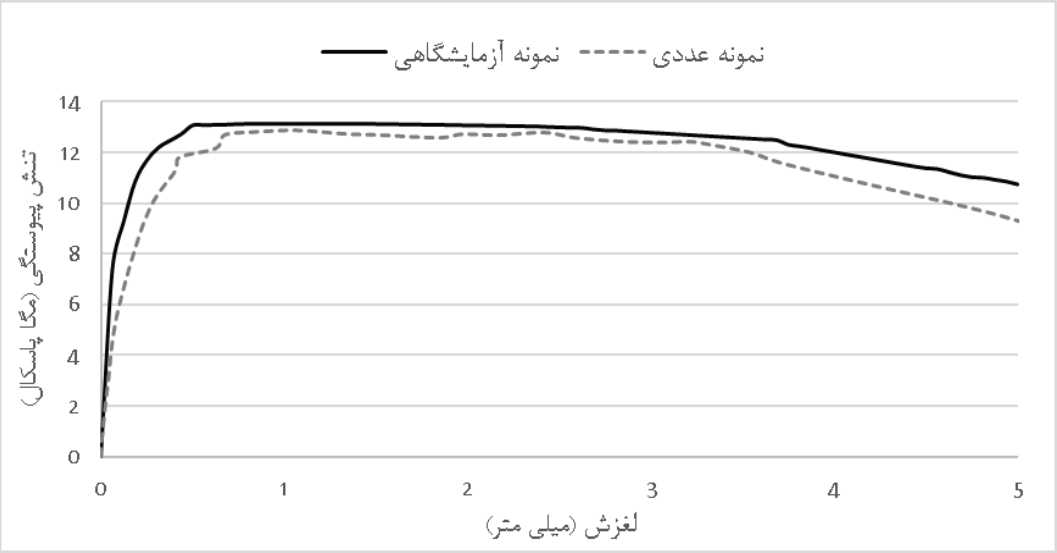
سختی اختصاص داده شده به این فنرها بر اساس مدل پیشنهادی آقایان اصلانی و شامی‌نژاد به همراه رابطه‌ی تنش پیوستگی- لغزش مدل CEB-FIP، بدست آمده است.



شکل (۵-۷) منحنی تنش پیوستگی-لغزش اختصاص داده شده به Translatorها

۵-۲-۵- صحت‌سنجی و بررسی خروجی‌های تحلیل

پس از انجام مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار، با استفاده از نتایج تحلیل نرم‌افزار، نمودار تغییرات تنش پیوستگی به ازای مقادیر مختلف جابه‌جایی بدست آمد. در شکل ۵-۸، نمودار آزمایش تاندلو و نمودار بدست آمده از تحلیل عددی انجام شده در نرم‌افزار نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، همگرایی قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی وجود دارد.



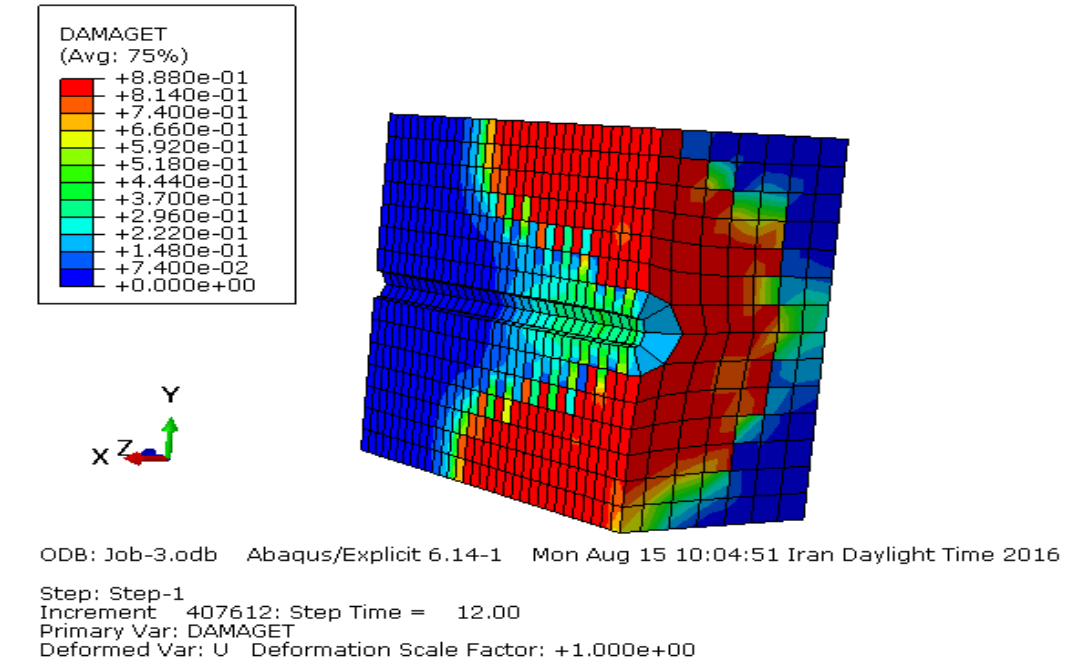
شکل (۵–۸) مقایسه‌ی تنش پیوستگی نمونه آزمایشگاهی با مدل اجزای محدود نمونه کنترل

نتایج تحلیل نمونه به صورت تنش موجود در آرماتور و تنش پیوستگی نمایش داده شده است.

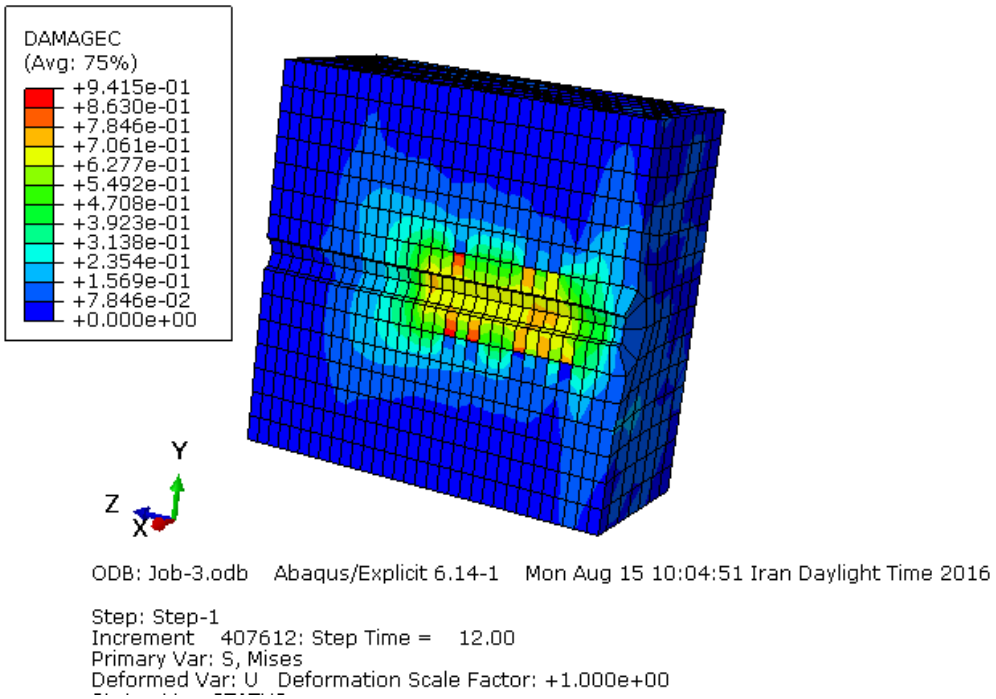
همانگونه که در شکل ۵-۹ مشاهده می‌گردد، با اعمال جابه‌جایی به نوک آرماتور نیروی کششی ایجاد شده در آرماتور تا لحظه رسیدن به ابتدای سطح بتن به دلیل نبود مقاومتی، ثابت می‌ماند، ولی پس از رسیدن نیرو به اولین گروه Translator، نیروی کششی به دلیل مقاومت آن‌ها کاهش پیدا کرده و تا انتهای آرماتور این روند ادامه می‌یابد.

کشیدگی آرماتور باعث بوجود آمدن فشار در بتن اطراف آرماتور و کشش در بتن دور از اطراف محل پیوستگی می‌گردد.

الف



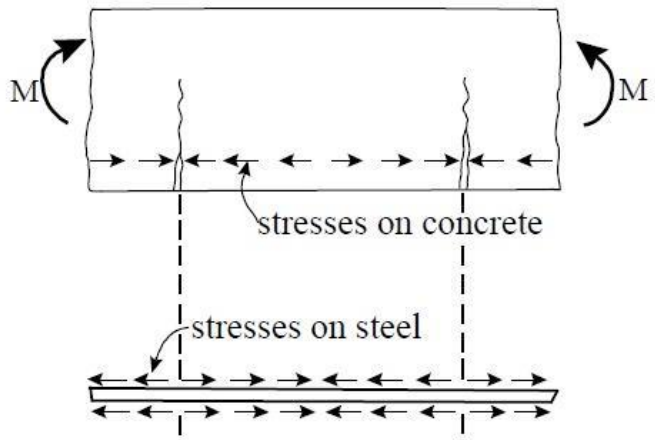
ب



شکل (۵–۹) نتایج تنش پیوستگی در آرماتور و بتن در نرم افزار ABAQUS الف) خرابی کششی ب) خرابی فشاری

۵-۳- تحلیل اجزای محدود آزمایش خمش سه نقطه‌ای تیر بتن مسلح

بررسی عملکرد تنش برشی بین آرماتور و بتن که سبب انتقال نیرو از بتن به آرماتور می‌گردد در نواحی کششی بتن، که در آن‌جا قادر به تحمل تنش‌های کششی نمی‌باشد بسیار مهم و حیاتی است. عدم وجود پیوستگی سبب لغزش آرماتور در بتن شده و آرماتور نقش تقویتی خود را از دست خواهد داد (شکل ۵-۱۰).



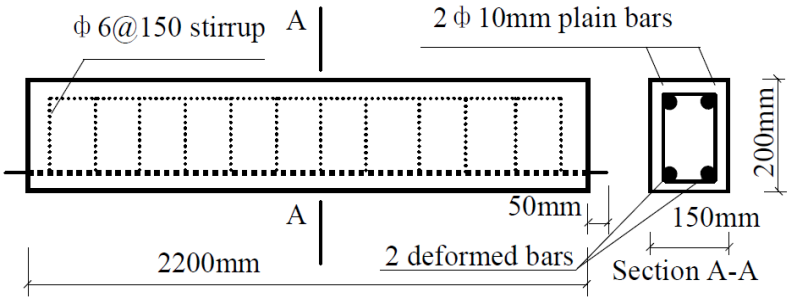
شکل (۵-۱۰) رفتار پیوستگی بتن و آرماتور در تیر بتن مسلح [۴۸]

۵-۳-۱- مدل‌سازی

پس از بررسی رفتار پیوستگی در آزمایش بیرون کشیدگی، به منظور بررسی رفتار پیوستگی بین بتن و آرماتور، بر عملکرد تیرهای بتن مسلح از آزمایش انجام شده توسط گو[۱] و همکاران استفاده شده است [۴۹]. مشخصات نمونه‌های استفاده شده در آزمایش گو و همکاران در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. در این مدل تیر بتنی با مقطع مستطیلی به ابعاد ۱۵۰*۲۰۰*۲۲۰۰ میلی‌متر همراه با میلگرد عرضی و اعمال بار به صورت کنترل تغییر مکان مشابه با کار آزمایشگاهی مدل‌سازی شده است. برای

۱ . Guo et al

مدل‌سازی نمونه‌های بتنی و فولادی از المان سه بعدی و ۸ گرهی همگن C3D8R در مدل‌سازی استفاده شده است.



شکل (۵-۱۱) جزئیات هندسه‌ی نمونه‌ی آزمایش گو و همکاران [۴۹]

۵-۳-۲- خصوصیات مواد

مشخصات مصالح برای آرماتور و بتن در جدول ۵-۳ و ۵-۴ به ترتیب نشان داده شده است. همچنین نمودارهای تنش-کرنش فشاری و کششی به ترتیب، طبق آیین نامه‌ی بتن اروپا و مدل سخت‌شوندگی کششی واهالانتری ارائه شده و برای ترک خوردگی بتن و رسیدن به مرحله‌ی پلاستیک از مدل آسیب دیده‌ی بتن نیز استفاده شده است.

جدول (۵-۳) مشخصات آرماتور

ضریب پواسون	وزن مخصوص (N/mm^3)	مدول یانگ (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
۰,۳	$۷,۷*۱۰^{-۶}$	$۲*۱۰^{۵}$	۳۵۰

جدول (۵-۴) مشخصات بتن

ضریب پواسون	وزن مخصوص (N/mm^3)	مدول یانگ(MPa)	بیشینه تنش کششی (MPa)	بیشینه تنش فشاری (MPa)
۰,۲	$۲,۴*۱۰^{-۶}$	$۲,۴۳*۱۰^{۴}$	۲,۹	۲۸,۶

همچنین مقدار زاویه اتساع بتن (ψ) (زاویه‌ی اتساع داخلی نسبت کرنش حجمی به کرنش برشی مصالح

است) برابر ۳۴ درجه در نظر گرفته شده است. با افزایش این زاویه، شکل‌پذیری بتن بیشتر می‌شود.

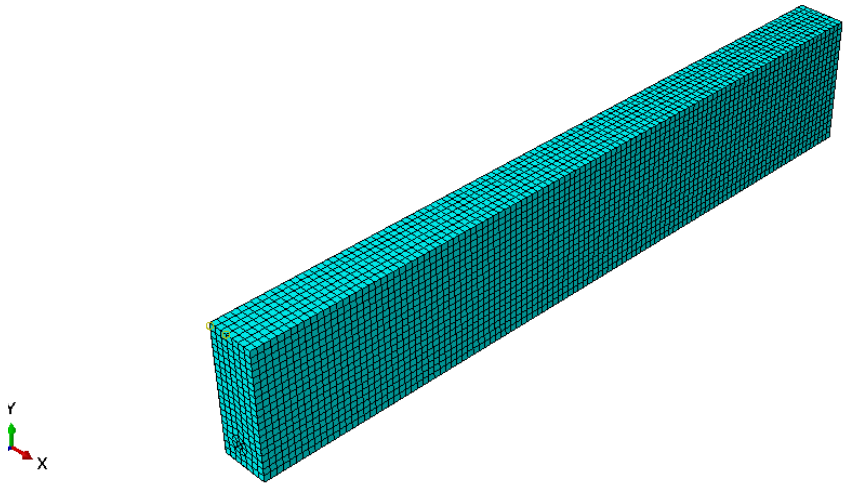
۵-۳-۳- اندرکنش

جهت تعریف اندرکنش از ۶۸ عدد Translator در طول پیوستگی استفاده شده است، که خصوصیات رفتاری Translatorها با توجه به خصوصیات بتن و آرماتور و سختی اختصاص داده شده به این فنرها بر اساس مدل پیشنهادی آقایان اصلانی و شامی‌نژاد به همراه رابطه‌ی تنش پیوستگی- لغزش مدل CEB-FIP، بدست آمده است.

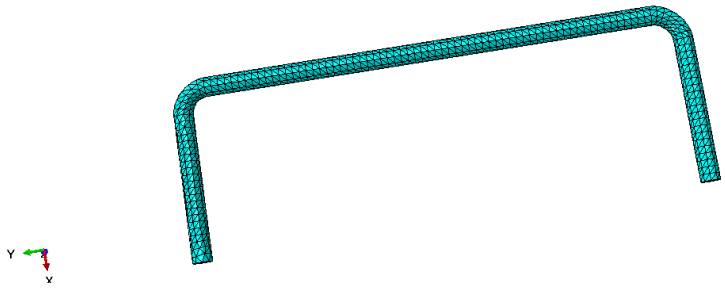
جهت تعریف آرماتورهای عرضی به همراه آرماتورهای فشاری از قید مدفون (Embeded Region) جهت مدفون کردن در داخل بتن استفاده شده است. در قید ناحیه مدفون المان یا گروهی از المان‌ها در المان میزبان جاسازی می‌شود. اگر گره المان مدفون در داخل میزبان قرار داشته باشد، درجه‌ی آزادی انتقالی در آن گره حذف و گره تبدیل به گره مدفون می‌شود. درجات انتقالی گره مدفون مقید به مقدار حاصل از درون‌یابی درجات آزادی مربوطه در المان میزبان می‌شود. المان‌های مدفون اجازه داشتن درجات آزادی چرخشی را دارند. المان میزبان نیز فقط می‌تواند درجات آزادی انتقالی داشته باشد. تعداد درجات آزادی انتقالی در یک گره از المان مدفون باید برابر تعداد آن‌ها در یک گره از المان میزبان باشد. در این مدل‌سازی از لغزش بین بتن و آرماتور صرف‌نظر می‌گردد و تمام آرماتورهای عرضی و فشاری با استفاده از قید ناحیه مدفون در المان میزبان که تیر بتنی می‌باشد جای می‌گیرند.

۵-۳-۴- مش‌بندی

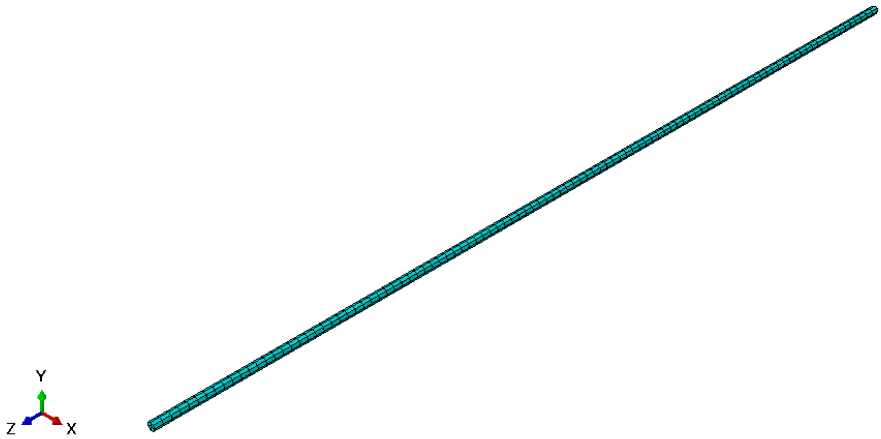
پس از بررسی و امتحان شبکه‌بندی‌های مختلف، شبکه‌های منتخب زیر با دقت قابل قبولی برای اجزای مختلف مدل انتخاب شدند.



شکل (۵-۱۲) شبکه بندی تیر بتن مسلح



شکل (۵-۱۳) شبکه بندی آرماتورهای عرضی

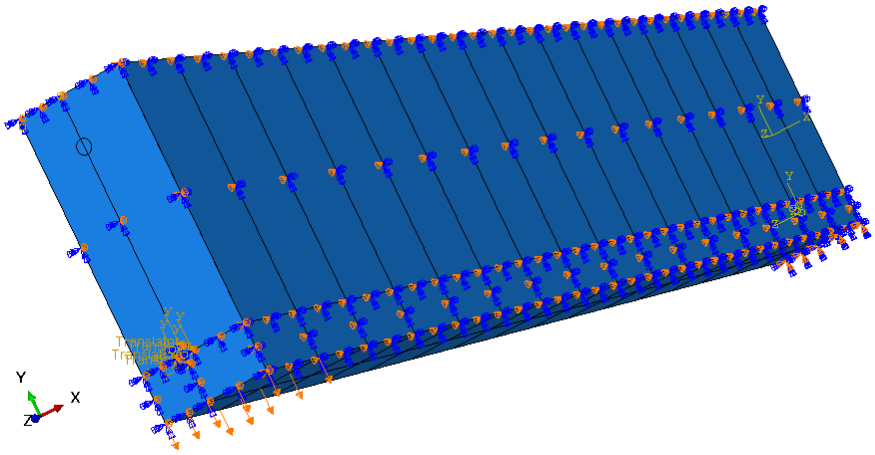


شکل (۵–۱۴) شبکه بندی آرماتورهای طولی کششی و فشاری

۵-۳-۵- بارگذاری و تحلیل

تحلیل با استفاده از تحلیل‌گر دینامیکی صریح (Dynamic Explicit) با سرعت بارگذاری دینامیکی ۰٫۳ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شده است. توجه به این نکته حائز اهمیت است که سرعت بارگذاری به نحوی انتخاب شده است که نسبت انرژی جنبشی در مواد از ۱۰ الی ۱۵ درصد انرژی داخلی مواد بیشتر نگردد. جهت کاهش مدت زمان تحلیل، مدل را به صورت متقارن (۱/۲) نسبت به صفحه yz مدل‌سازی شده است. همانطور که در شکل ۵-۱۵ مشاهده می‌گردد، جهت اعمال بار از تغییر مکان وسط دهانه به مقدار ۱۵۰ میلی‌متر و با الگوی خطی (Ampilitude) استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی صحیح شرایط تکیه‌گاه با ایجاد حدفاصل در دو طرف تیر اصلی، تکیه‌گاه مفصلی را در سمت چپ و راست شبیه‌سازی گردیده است.

جهت حاصل شدن نمودار نیرو-خیز وسط دهانه، با تعریف Set در عکس العمل تکیه‌گاهی میزان نیروی ایجاد شده را با توجه به خیز اعمالی بدست می‌آید.



شکل (۵–۱۵) نحوه‌ی بارگذاری و شرایط مرزی در نمونه‌ی تیر بتن مسلح

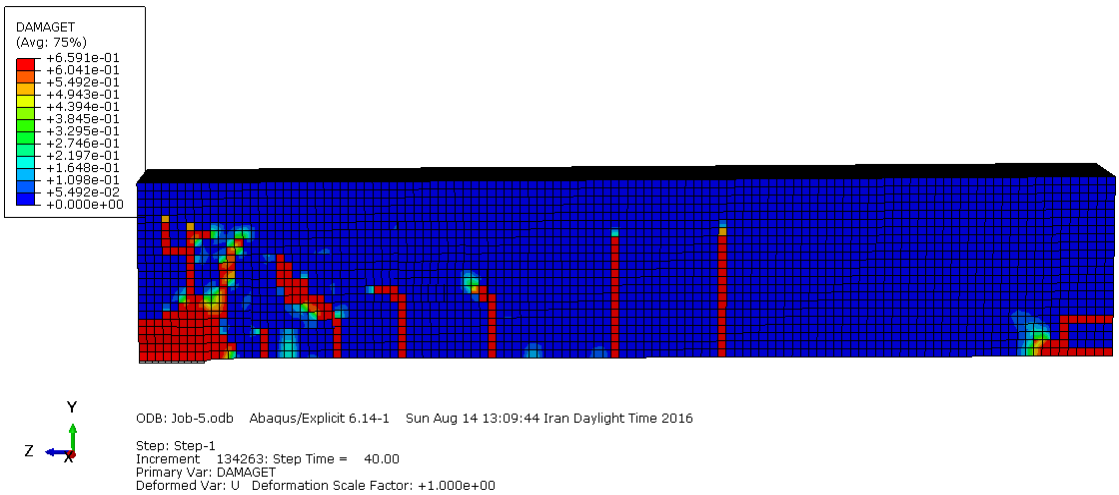
۵-۳-۶- صحت‌سنجی و بررسی خروجی‌های تحلیل

پس از انجام مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار، با استفاده از نتایج تحلیل نرم‌افزار، نمودار تغییرات نیرو به ازای مقادیر مختلف جابه‌جایی بدست آمد. در شکل ۵-۱۶، نمودار آزمایش گو و همکاران و نمودار بدست

آمده از تحلیل عددی انجام شده در نرم‌افزار نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، همگرایی قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی وجود دارد.

شکل (۵–۱۶) مقایسه‌ی تغییرات نیروی خمشی وسط دهانه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی گو و همکاران با مدل اجزای محدود

نتایج تحلیل نمونه به صورت خیز وسط دهانه و نیرو نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل ۵-۱۷ مشاهده می‌شود، با اعمال جابه‌جایی در وسط دهانه، ابتدا ترک‌های خمشی قائم ایجاد می‌شوند و به دنبال آن ترک‌ها در اثر وجود برش به سمت افق مایل می‌شوند و در نهایت تیر گسیخته می‌شود.



شکل (۵–۱۷) نحوه انتشار خرابی بتن کششی در زمان گسیختگی

فصل ششم

بررسی اثر خوردگی بر رفتار پیوستگی تیرهای بتن مسلح

۶-۱- مقدمه

تجربیات دو دهه‌ی گذشته نشان داده است که عدم دقت در طراحی و اجرای سازه‌های بتن مسلح به خصوص عدم توجه به شرایط محیطی در بسیاری موارد منجر به خسارات جبران ناپذیری شده است. متاسفانه اکثر مهندسین در طراحی و ساخت تیرهای بتن مسلح توجهی به مسائل حاد محیطی که می‌تواند در تخریب و خوردگی آن‌ها نقش عمده‌ای داشته باشد ندارند. پیامد این کم توجهی آن است که عواملی همچون خوردگی و فرسایش آرماتورها و عدم نگهداری صحیح منجر به فرسودگی زودرس سازه‌های بتنی از جمله تیرها خواهد شد. پیش‌بینی عمر طرح واقعی سازه‌های بتن مسلح با استفاده از آزمایش‌های خوردگی تسریع یافته کاری دشوار و پر هزینه است.

به‌منظور درک اثر خوردگی بر رفتار پیوستگی تیرهای بتنی، تحلیل پارامتریک نقش به سزایی خواهد داشت تا قابلیت پیش‌بینی این رفتار را در قالب یک دستورالعمل جامع برای طراحی سازه‌های جدید بتن مسلح در معرض فرآیند خوردگی در نظر گرفت.

بدین منظور در این فصل با در نظر گرفتن ملزومات طراحی به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر رفتار پیوستگی تیرهای بتن مسلح پرداخته می‌شود. پارامترهایی که در این فصل مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت به ترتیب زیر خواهند بود؛

۱- تاثیر فرآیند خوردگی بر مقاومت پیوستگی

۲- تاثیر فرآیند خوردگی بر مقاومت خمشی

۳- تاثیر قطر آرماتور بر مقاومت خمشی در حین فرآیند خوردگی

۴- تاثیر مقاومت بتن بر مقاومت خمشی در حین فرآیند خوردگی

همان‌طور که در فصل قبل مدل عددی آزمایش بیرون کشیدگی و خمش در حالت بدون خوردگی با نمونه‌ی آزمایشگاهی تاندلو و گو و همکاران همگرایی خوبی داشتند، تاثیر پارامترهای فوق را بر مدل عددی اعمال کرده و بررسی نموده است.

۶-۲- نمونه‌ها

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای ذکر شده، در ابتدا تاثیر درصدهای مختلف خوردگی ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ را بر مدل آزمایش بیرون کیشدن آرماتور از داخل بتن (Pull-Out) بررسی نموده و با نتایج آزمایشگاهی تاندلو مقایسه می‌شود و سپس نتایج بدست آمده از نمودار نیرو-خیز وسط دهانه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی گو و همکاران را با مدل عددی در درصدهای خوردگی ۶,۵٪، ۱۴٪ و ۳۲,۵٪ مقایسه و تحلیل می‌شود. همچنین درصدهای مختلف خوردگی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ را بر مدل عددی آزمایش خمش سه نقطه‌ای بررسی و تحلیل می‌گردد. در نهایت تاثیر قطر آرماتور و مقاومت بتن را در حالت بدون خوردگی و خوردگی در مقادیر ذکر شده با یکدیگر مقایسه و بررسی می‌شود.

اولین حرف در شناسه‌ی نمونه‌ها مربوط به نوع تست مورد نظر می‌باشد که حرف P مربوط به تست بیرون کشیدن آرماتور از داخل بتن (Pull-Out)، حرف F مربوط به تست خمش سه نقطه‌ای می‌باشد. دومین حرف در شناسه‌ی نمونه‌ها مربوط به مقاومت فشاری بتن است. در این پژوهش از سه بتن با مقاومت‌های ۲۰، ۲۸,۶ و ۳۰,۹ مگاپاسکال استفاده شده است که به ترتیب L، M و H معرف این مقادیر می‌باشند. همچنین سومین حرف مربوط به قطر آرماتور است که A، B و C به ترتیب برابر با قطر ۱۲، ۱۴ و ۱۶ می‌باشد و عدد انتهایی بیانگر میزان درصد خوردگی نمونه‌ی مورد نظر می‌باشد.

به عنوان مثال منظور از PMB5، بیانگر مطالعه‌ی عددی بر نمونه‌ی تحت اثر آزمایش بیرون کشیدگی با بتن به مقاومت ۲۸,۶ مگاپاسکال و قطر ۱۴ میلی‌متر و ۵ درصد خوردگی می‌باشد.

۶-۳- نحوه‌ی اعمال فرآیند خوردگی

در عضو بتن مسلح پدیده‌ی خوردگی باعث تبدیل قسمتی از فولاد مصرف شده به ماده‌ی زنگ آهن می‌شود که به صورت پوسته پوسته و متخلل در سطح آرماتور تشکیل می‌شود. طبیعی است این امر سطح مقطع آرماتور را کاهش داده و باعث می‌شود ظرفیت باربری عضو به طور کامل تغییر نماید. بنابراین در تحلیل و مدل‌سازی عضو بتن مسلح تحت اثر خوردگی، کاهش سطح مقطع آرماتور طبق

رابطه‌ی ۵-۱ اعمال گردیده است [۳۸].

$$A=\frac{\pi.\varphi_R^2}{4}=\frac{\pi.(\varphi_0-\alpha x)^2}{4} \qquad ۱-۶$$

که در آن φ_0 قطر اولیه‌ی آرماتور و X میزان نفوذ محصولات خوردگی با توجه به مدت زمان خوردگی و شدت جریان آن است که طبق رابطه‌ی ۵-۲ محاسبه می‌گردد. همچنین α ضریبی که بستگی به نوع فرآیند خوردگی دارد که معمولا مقدار آن برای خوردگی یکنواخت برابر ۲ و برای خوردگی از نوع حفره‌ای بین ۴-۸ می‌باشد. در این پژوهش با درنظر گرفتن خوردگی یکنواخت مقدار α برابر ۲ در نظر گرفته شده است.

$$X=5.85\ I.t \qquad ۲-۶$$

t مدت زمان خوردگی (سال) و I شدت جریان محصولات خوردگی ($\mu A/cm^2$) است.

در این پژوهش جهت اعمال فرآیند خوردگی و بررسی تاثیر آن بر رفتار پیوستگی اعضای بتن مسلح همانطور که در فصل سه اشاره شد از مدل ارائه شده توسط لاندگرین استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل ۳-۴ مشاهده گردید، جهت کاهش زمان تحلیل با کم کردن تعداد گره‌ها در مدل، از ادغام فصل مشترک خوردگی و پیوستگی در یک لایه استفاده شد. در این پژوهش با در نظر گرفتن تغییر شکل ناشی از فرآیند خوردگی، میزان تنش فشاری وارده به بتن را در جهت شعاعی از طرف آرماتور اعمال گردیده و رفتار پیوستگی و ترک‌خوردگی را براساس آزمایش بیرون کشیدگی و خمش بررسی گردیده است؛ بر همین اساس:

$$a=-r+\sqrt{r^2+(\nu-1).(2rx-x^2)} \qquad ۳-۶$$

$$\varepsilon_{cor}=\frac{u_{ncor}-a}{x+a} \qquad ۴-۶$$

$$t_n=K_{cor}.\varepsilon_{cor}^p \qquad ۵-۶$$

در این روابط، r قطر آرماتور، x میزان نفوذ خوردگی که از رابطه‌ی ۶-۲ محاسبه می‌گردد، ν نسبت حجمی محصولات خوردگی به فولاد، a و u_{ncor} به ترتیب افزایش آزاد و واقعی شعاعی ناشی از محصولات خوردگی می‌باشد. همچنین ε_{cor} و t_n ، کرنش و تنش شعاعی حاصل شده از محصولات خوردگی می‌باشد

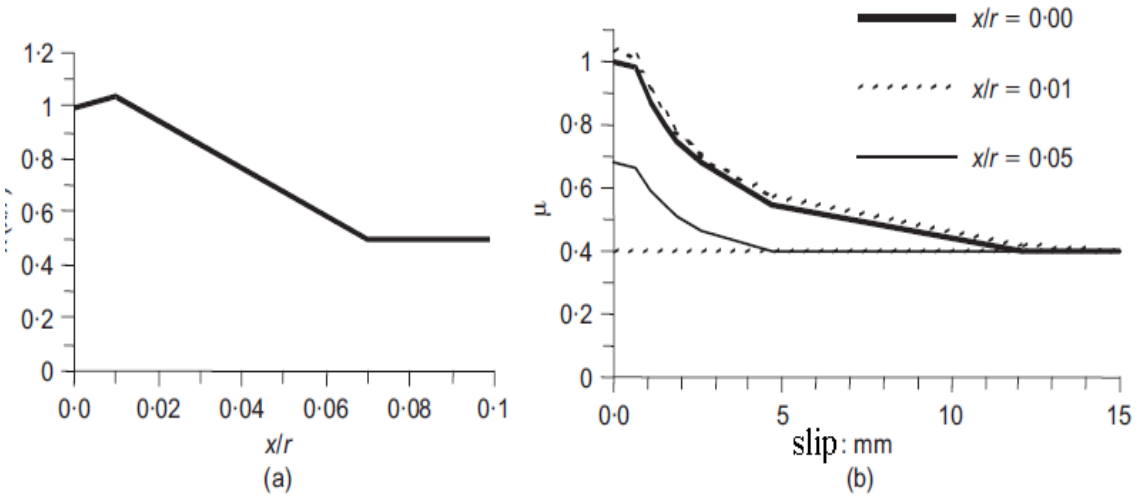
و p پارامتر ثابت (p=۷) است و K_{cor} سختی محصولات خوردگی می‌باشد (Kcor = ۷ -۱۴ GPa).

لاندگرین با انجام آزمایش‌های بیرون کشیدگی، تأثیر خوردگی بر رفتار پیوستگی را بررسی نمود و به نقش میزان فرآیند خوردگی بر اصطکاک بین بتن و آرماتور پی‌برد. بنابراین او فرض نمود که میزان خوردگی آرماتور با ضریب اصطکاک متناسب است.

$$\mu(K) = k(x/r).\mu_0(\mathrm{K}), \text{but } \mu(\mathrm{K}) \geq 0.4 \qquad ۶-۶$$

در این رابطه μ(K) ضریب اصطکاک خوردگی می‌باشد و K(x/r) پارامتری است که متناسب با میزان نفوذ محصولات خوردگی مطابق شکل ۶-۱ تغییر می‌نماید.

میزان تنش شعاعی اعمالی با توجه به درصدهای مختلف خوردگی در جدول ۵-۱ ارائه شده است. همچنین مقادیر مختلف ضریب اصطکاک با توجه به درصدهای مختلف خوردگی درون‌یابی خطی و اعمال می‌شود.



شکل(۶-۱) a) تغییرات K(x/r) براساس میزان نفوذ خوردگی (b ضریب اصطکاک خوردگی در سطوح مختلف [۳۶]

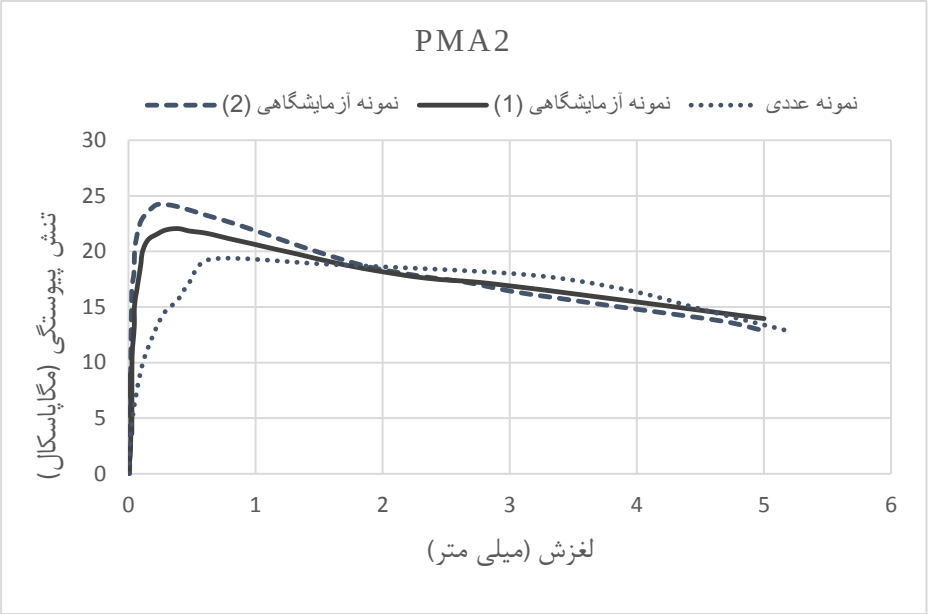
جدول (۶-۱) پارامترهای محاسباتی جهت تعیین تنش شعاعی در آرماتور ۱۲ میلی‌متر

تنش شعاعی (MPa)	کرنش شعاعی	افزایش واقعی شعاعی ناشی از خوردگی (μm)	افزایش آزاد شعاعی ناشی از خوردگی (μm)	نفوذ خوردگی (μm)	زمان (ساعت)	خوردگی (درصد)
-۲۰,۳۲۶	-۰,۴۳۴	۰,۴۸۶	۳,۱۹۲	۳,۰۴۲	۲۲,۷۷۳	۱
-۲۱,۶۱۶	-۰,۴۳۸	۰,۹۳۲	۶,۴۴۶	۶,۱۴۵	۴۶,۰۱۱	۲
-۲۲,۹۷۴	-۰,۴۴۲	۱,۳۳۷	۹,۷۶۳	۹,۳۱۳	۶۹,۷۲۸	۳
-۲۵,۹۱۱	-۰,۴۴۹	۲,۰۱۶	۱۶,۵۹۶	۱۵,۸۴۸	۱۱۸,۶۶۰	۵
-۲۸,۳۱۸	-۰,۴۵۵	۲,۴۰۶	۲۱,۹۰۲	۲۰,۹۳۳	۱۵۶,۷۷۳	۶,۵
-۳۴,۶۸۳	-۰,۴۶۹	۲,۸۹۰	۳۴,۹۳۱	۳۳,۴۵۸	۲۵۰,۵۰۴	۱۰
-۴۳,۴۰۳	-۰,۴۸۴	۲,۹۳۷	۵۱,۰۴۳	۴۹۰,۰۲۰	۳۶۷,۰۱۸	۱۴
-۵۹,۹۰۳	-۰,۵۰۷	۳,۰۳۷	۷۸,۰۴۱	۷۵,۲۸۰	۵۶۳,۶۳۵	۲۰
-۱۱۱,۲۸۵	-۰,۵۵۳	۳,۷۶	۱۴۸,۵۵	۱۴۴,۹۸۴	۱۰۸۵,۵۱۹	۳۲,۵

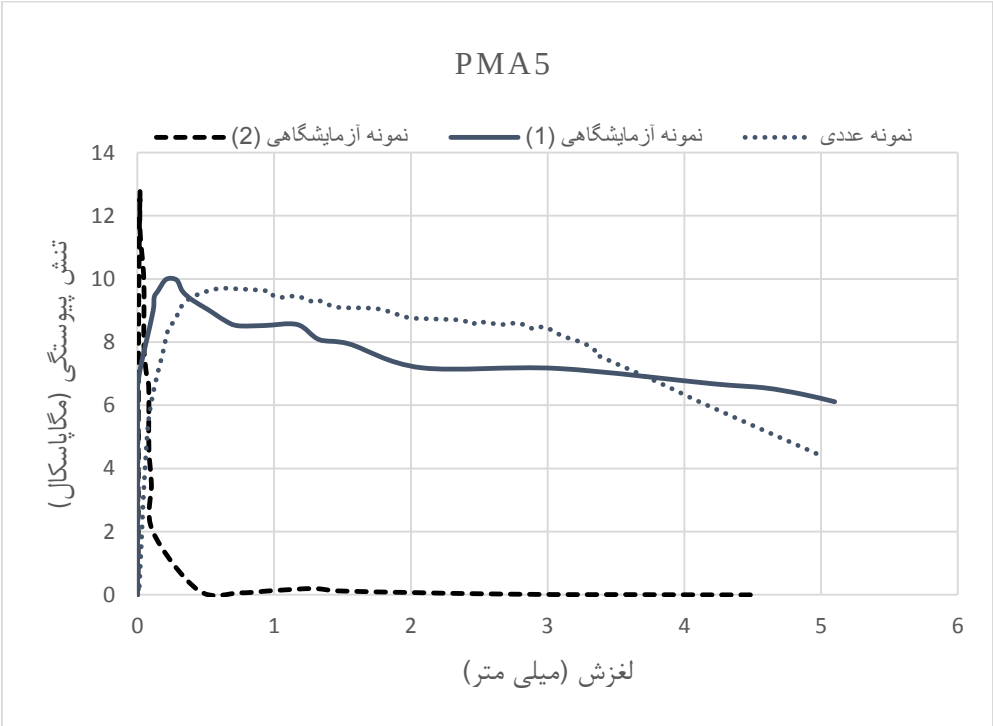
۶-۴- نتایج بدست آمده از تاثیر فرآیند خوردگی بر آزمایش بیرون کشیدگی

با توجه به مقادیر تنش‌های شعاعی بدست آمده از جدول ۶-۱ و ضرایب اصطکاک متناظر، به بررسی و مقایسه‌ی رفتار پیوستگی آرماتور و بتن مطابق با آزمایش‌های صورت گرفته توسط تاندلو با نتایج حاصل شده از مطالعه عددی پرداخته می‌شود.

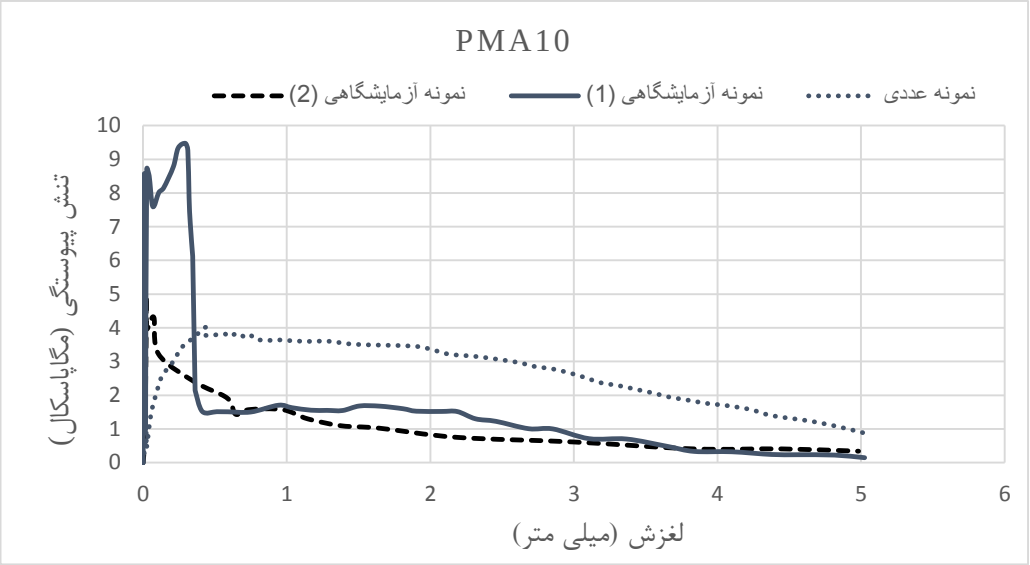
در شکل‌های ۶-۲، ۶-۳، ۶-۴ و ۶-۵ منحنی‌های تنش پیوستگی-لغزش برای درصدهای مختلف خوردگی نمونه PMA مشاهده می‌شود.



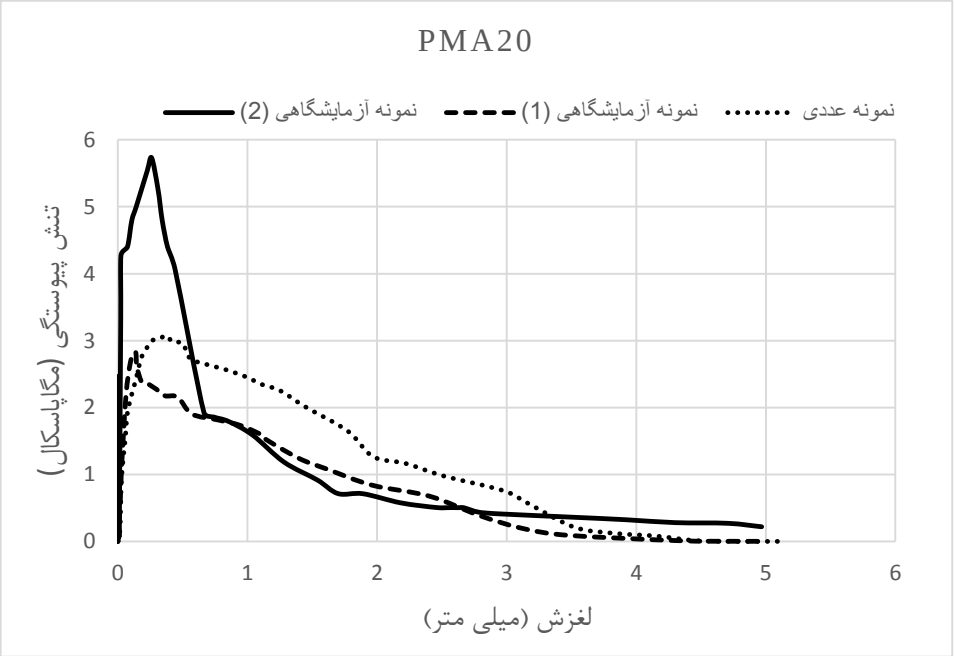
شکل (۶-۲) منحنی تنش پیوستگی-لغزش نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن (Pull-Out) در ۲٪ خوردگی



شکل (۶-۳) منحنی تنش پیوستگی-لغزش نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن (Pull-Out) در ۵٪ خوردگی

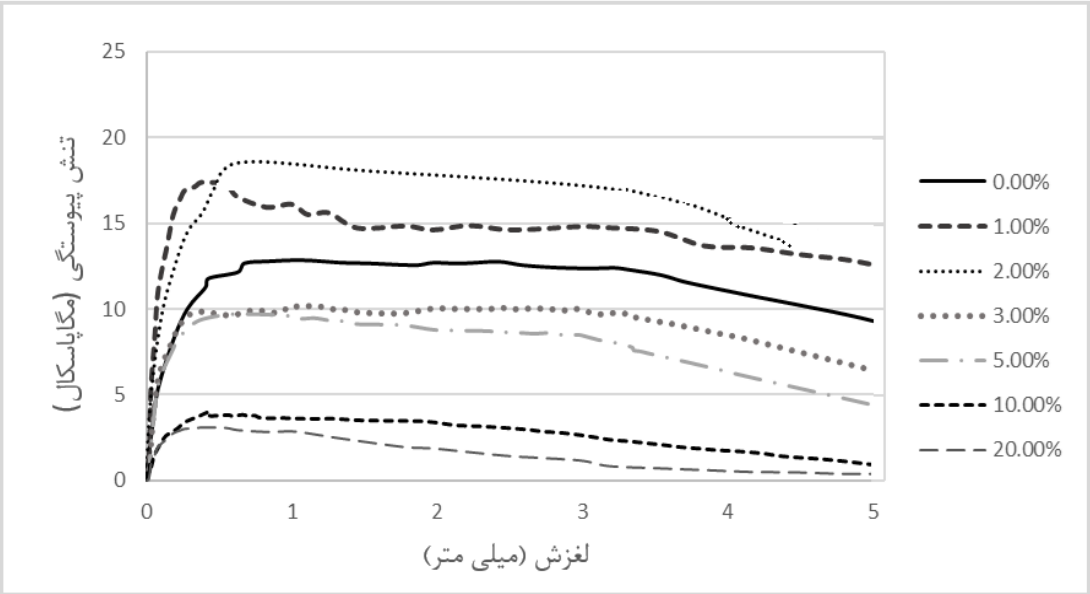


شکل (۶-۴) منحنی تنش پیوستگی-لغزش نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن (Pull-Out) در ۱۰٪ خوردگی



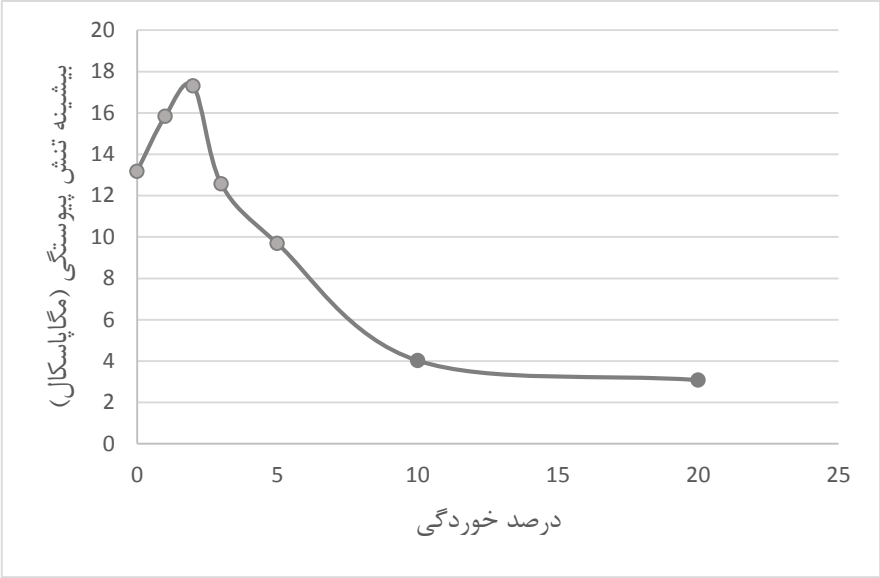
شکل (۶-۵) منحنی تنش پیوستگی-لغزش نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن (Pull-Out) در ۲۰٪ خوردگی

همچنین جهت بررسی دقیق‌تر تاثیر خوردگی بر رفتار پیوستگی، به مطالعه‌ی عددی دو درصد خوردگی ۱٪ و ۳٪ نیز پرداخته شد تا برازش بهتری از نمودار بیشینه‌ی مقاومت پیوستگی – درصد خوردگی حاصل شود.



شکل (۶-۶) تغییرات تنش پیوستگی در مقابل جابه‌جایی در درصدهای مختلف خوردگی

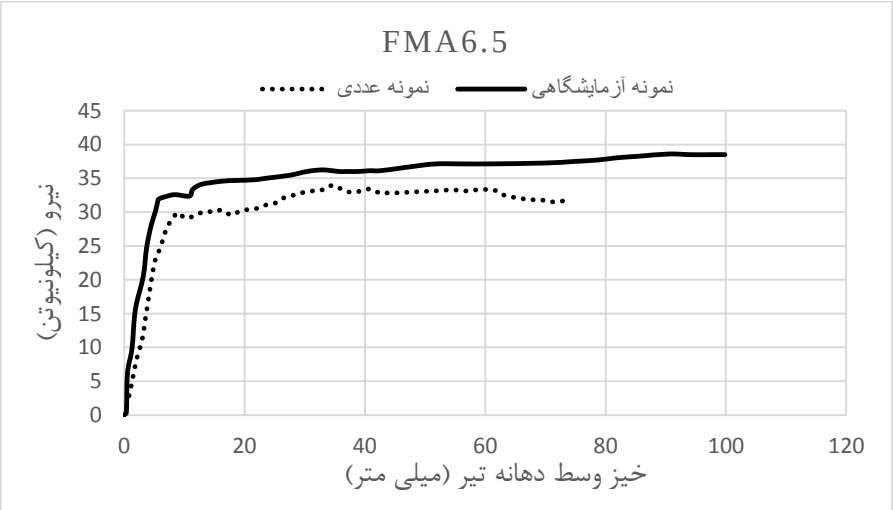
شکل ۶-۷ نشان دهنده‌ی تغییرات بیشنه‌ی مقاومت پیوستگی با افزایش درصد خوردگی می‌باشد. همان‌طور که از نمودار مشخص است، با افزایش خوردگی، مقدار تنش پیوستگی بین بتن و آرماتور تا خوردگی حدود ۲٪ افزایش می‌یابد و بعد از آن به شدت کاهش می‌یابد. دلیل آن است که با شروع فرآیند خوردگی، انبساط حجمی محصولات ناشی از خوردگی آرماتورها، فشاری را به پوشش بتنی اطراف آرماتور وارد می‌کند که منجر به افزایش مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور تا حدود ۲٪ می‌گردد. با افزایش این روند، فشار چشمگیر ناشی از انبساط حجمی محصولات منجر به ترک‌خوردگی پوشش بتنی اطراف آرماتور می‌گردد به طوری که دستاورد آن یک روند نزولی در مقاومت پیوستگی بتن و آرماتور به دلیل نفوذ محصولات خوردگی در لابه‌لای ترک‌ها می‌باشد. با افزایش شدت خوردگی، ترک‌های ایجاد شده عمیق‌تر می‌شوند که نتیجه‌ی آن کاهش مقاومت پیوستگی بین آرماتور و بتن است.



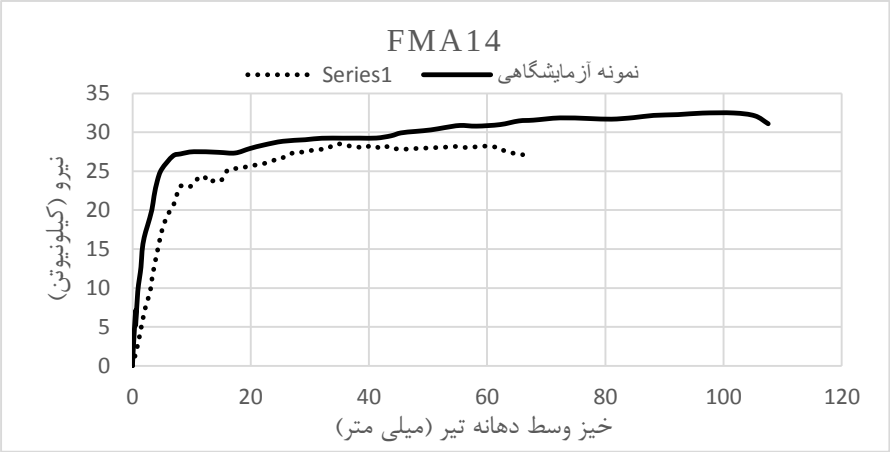
شکل (۶-۷) بیشنه‌ی تنش‌های پیوستگی برحسب درصدهای خوردگی متفاوت در آزمایش بیرون کشیدگی

۶-۵-نتایج بدست آمده از تاثیر فرآیند خوردگی بر آزمایش خمش سه نقطه‌ای

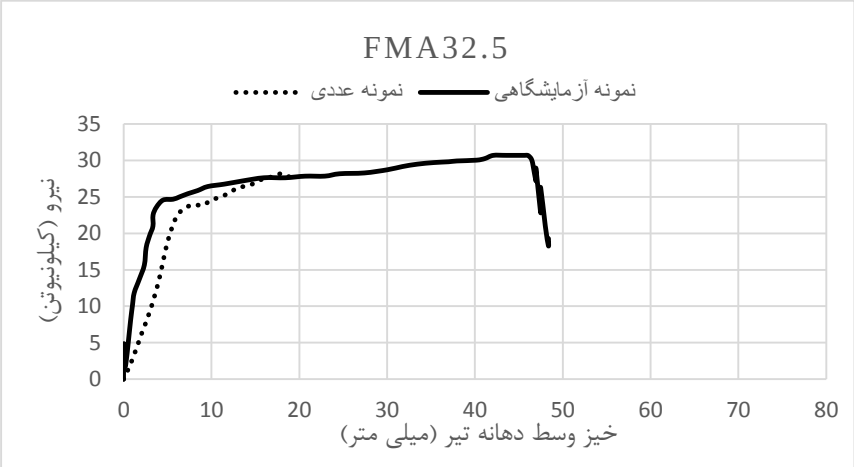
پس از بررسی تاثیر خوردگی بر مقاومت پیوستگی، به بررسی تاثیر آن بر عملکرد تیرهای بتن مسلح پرداخته می‌شود. در شکل‌های ۶-۸، ۶-۹ و ۶-۱۰ به بررسی و مقایسه‌ی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح مطابق با آزمایش‌های صورت گرفته توسط گو و همکاران با نتایج حاصل شده از مطالعه عددی پرداخته می‌شود.



شکل (۶-۸) منحنی نیرو-جابه‌جایی وسط دهانه‌ی تیر در نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست خمش سه نقطه‌ای در ۶٫۵٪ خوردگی



شکل (۶-۹) منحنی نیرو-جابه‌جایی وسط دهانه‌ی تیر در نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست خمش سه نقطه‌ای در ۱۴٪ خوردگی

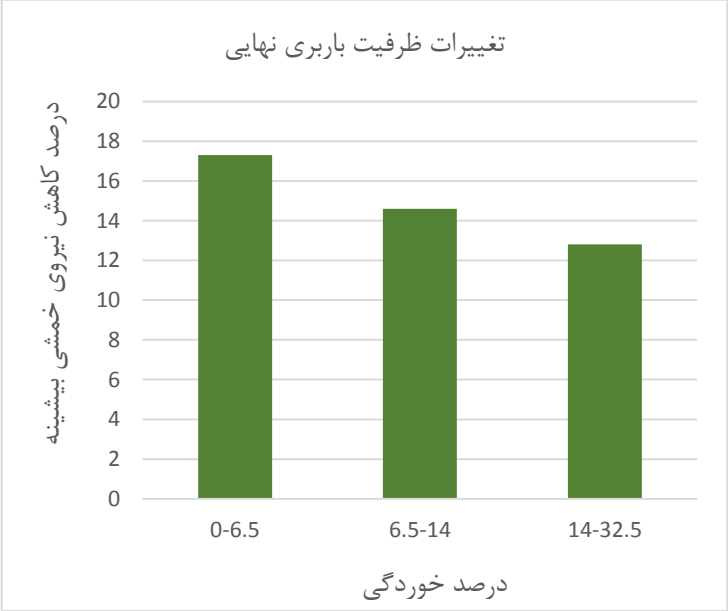


شکل (۶-۱۰) منحنی نیرو-جابه‌جایی وسط دهانه‌ی تیر در نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی تست خمش سه نقطه‌ای در ۳۲,۵٪ خوردگی

همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر بدست آمده از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی همگرایی قابل قبولی دارد. همچنین باید به این نکته توجه کرد که از درصد خوردگی ۶,۵ تا ۳۲,۵ مقدار بیشینه‌ی ظرفیت باربری و خیز بیشینه کاهش می‌یابد. علت عدم کاهش خیز بیشینه در نمودار آزمایشگاهی در نمونه‌ی تحت اثر ۱۴درصد خوردگی را خطای آزمایشگاهی می‌توان ذکر نمود. زیرا انتظار می‌رود همانند نمونه عددی با افزایش فرآیند خوردگی از سطح مقطع آرماتور کاسته شود و فرآیند تسلیم سریعتر اتفاق افتد که منجر به کاهش شکل‌پذیری می‌شود.

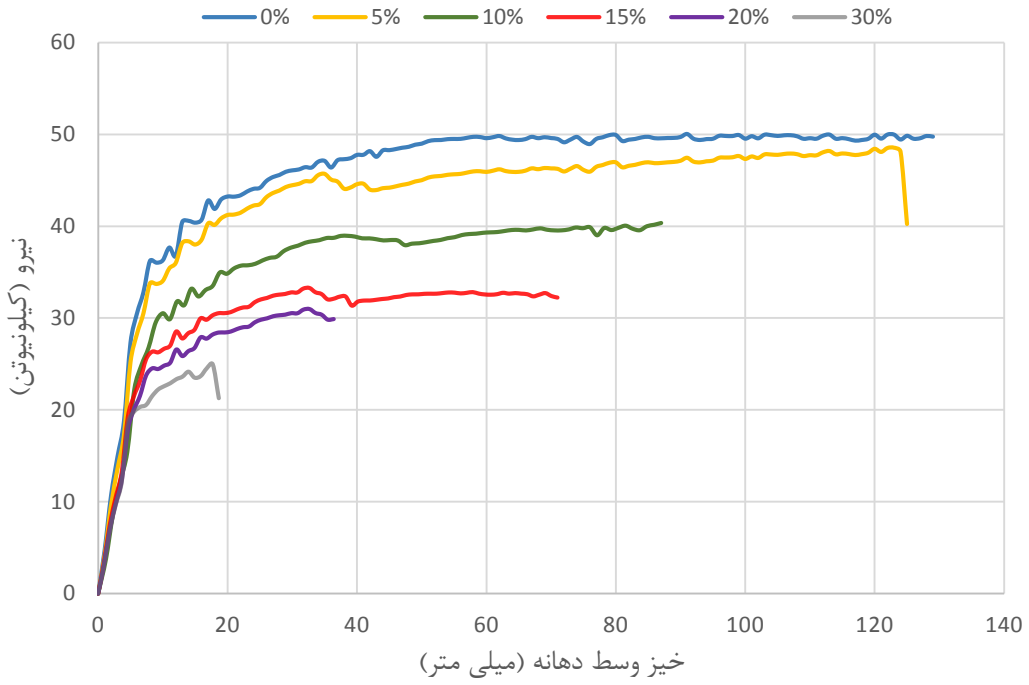
در شکل ۶-۱۱ تغییرات کاهش ظرفیت باربری نهایی در سه درصد خوردگی مذکور ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد خوردگی از تاثیر آن بر ظرفیت باربری خمشی کاسته

می‌شود که علت اصلی آن را می‌توان ناشی از کاهش مقاومت پیوستگی بتن و آرماتور و کاهش سطح مقطع آرماتور در درصدهای خوردگی مذکور دانست.



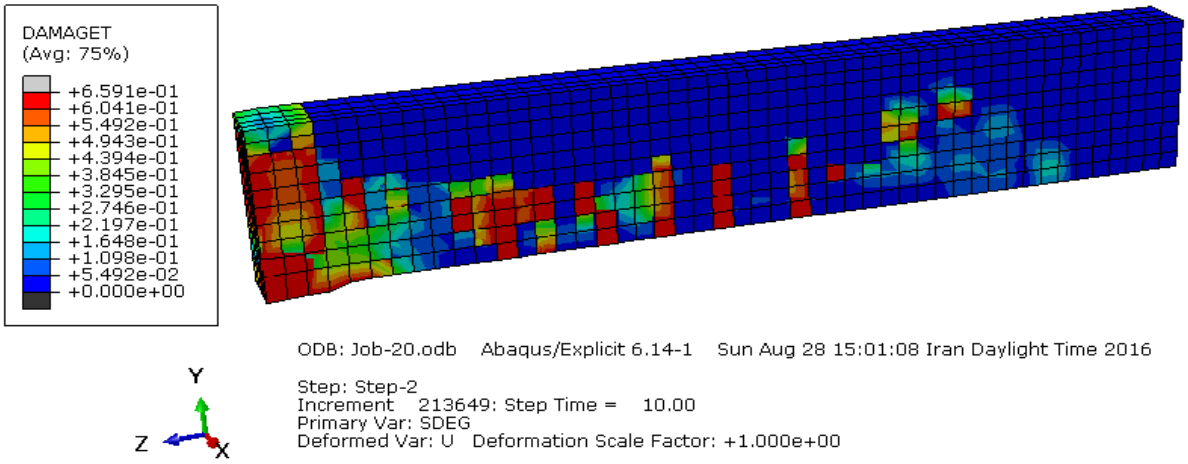
شکل (۶-۱۱) تغییرات کاهش ظرفیت باربری نهایی در درصدهای خوردگی ۶٫۵، ۱۴ و ۳۲٫۵.

شکل ۶-۱۲ نمایانگر تغییرات نیروی خمشی-خیز وسط دهانه‌ی تیر FHB در درصدهای مختلف خوردگی حاصل شده از مدل عددی می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد خوردگی به میزان پنج درصد، در مقدار ظرفیت باربری تیر کاهش قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود. علت این امر را می‌توان نیروی فشاری وارده از طرف محصولات خوردگی به بتن اطراف آرماتور دانست که با عامل کاهنده‌ی سطح مقطع آرماتور مقابله می‌نماید و مانع از کاهش محسوس ظرفیت باربری می‌شود. با ادامه‌ی افزایش روند خوردگی، کاهش سطح مقطع آرماتور و نفوذ محصولات خوردگی (با ضریب اصطکاک پایین‌تر) منجر به کاهش مقاومت برشی بین آرماتور و بتن می‌شود. نتیجه‌ی این فرآیند، تسلیم آرماتور و گسیختگی تیر در ظرفیت باربری کمتر می‌باشد.

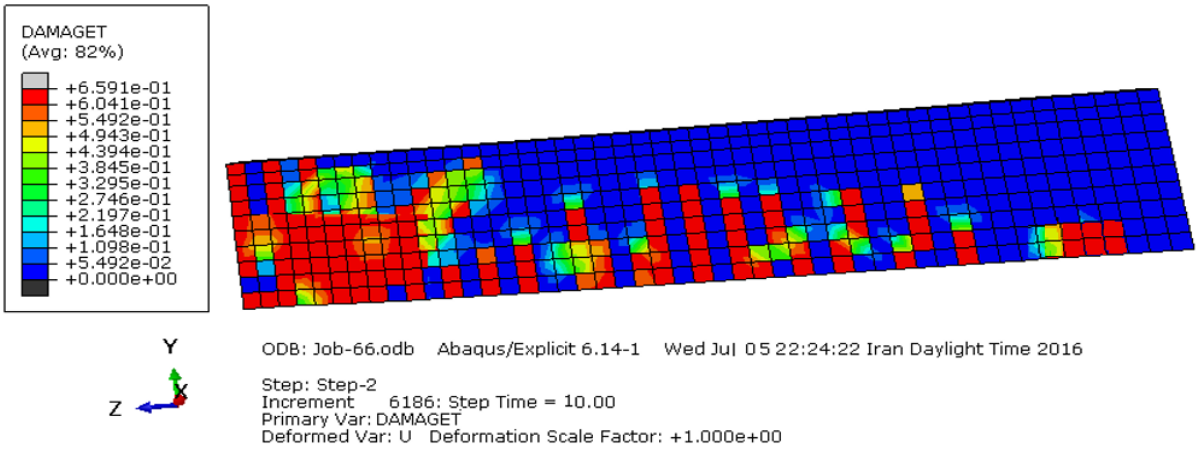


شکل (۶-۱۲) تغییرات نیروی خمشی در مقابل خیز وسط دهانه‌ی تیر بتنی در درصدهای مختلف خوردگی در نمونه FHB

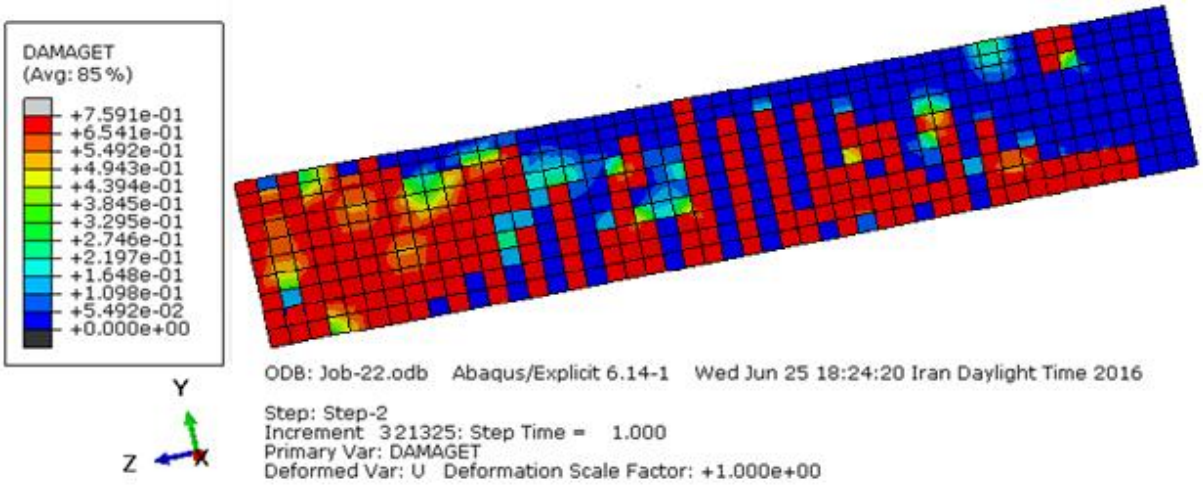
همان‌طور که در شکل‌های ۵-۱۷ و ۶-۱۳ تا ۶-۱۵ مشاهده می‌شود، با بررسی خرابی‌های ناشی از مقاومت کششی پایین بتن از نتایج تحلیل عددی در درصدهای مختلف خوردگی (۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۳۰٪) و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، افزایش ترک خوردگی در بتن و همچنین تغییر مد شکست از خمشی به شکست ترد ملاحظه می‌گردد. علت این امر را می‌توان عدم پیوستگی آرماتور با بتن در نظر گرفت که منجر به کاهش درصد مشارکت آرماتور در خمش می‌گردد و بنابراین عملکرد تیر بتن مسلح به تیر بتنی ساده نزدیک می‌شود.



شکل (۶-۱۳) نحوه‌ی انتشار خرابی بتن کششی در زمان گسیختگی تحت ۵٪ خوردگی



شکل (۶-۱۴) نحوه‌ی انتشار خرابی بتن کششی در زمان گسیختگی تحت ۱۰٪ خوردگی



شکل (۶-۱۵) نحوه‌ی انتشار خرابی بتن کششی در زمان گسیختگی تحت ۳۰٪ خوردگی

۶-۶- نتایج بدست آمده از تاثیر قطر آرماتور بر مقاومت خمشی تیر تحت اثر خوردگی

به منظور بررسی تاثیر قطر آماتور بر مقاومت خمشی تیر تحت اثر خوردگی با توجه به روابط ارائه شده در فصل سه از آرماتورهای به قطر متفاوت در ناحیه کششی استفاده شده است. در شکل ۶-۱۶ میزان نسبت ظرفیت باربری، با توجه به درصدهای خوردگی (۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) به ظرفیت باربری در حالت بدون خوردگی و قطر آرماتور (۱۲، ۱۴ و ۱۶) میلی‌متر، در تیر بتن مسلح با مقاومت ۲۸,۶ مقایسه شده است.

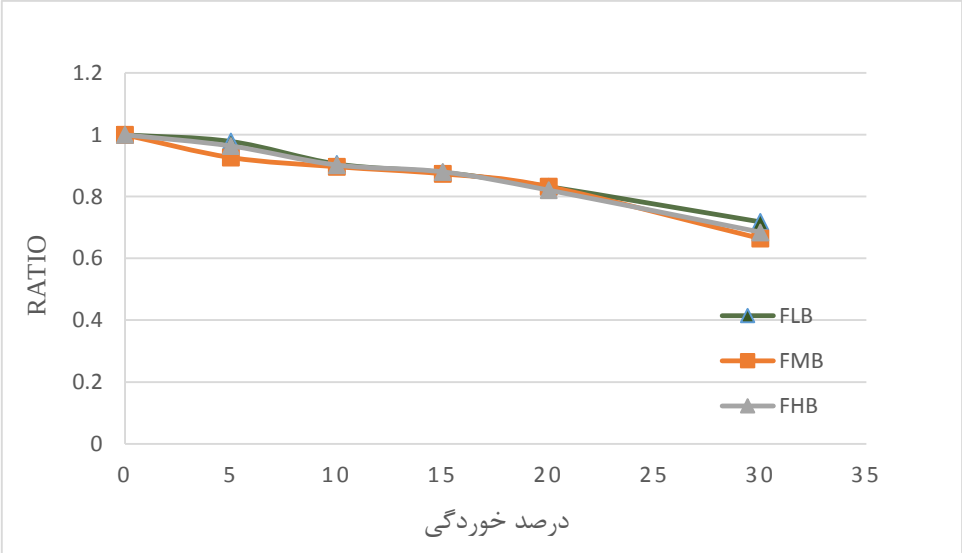
شکل (۶-۱۶) تاثیر قطر آرماتور در نمودار نسبت بار نهایی-درصد خوردگی آرماتور در تیر خمشی با مقاومت ۲۸,۶ مگاپاسکال

با بررسی تغییرات ظرفیت باربری، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر آرماتور میزان ظرفیت باربری در حدود ۵٪ خوردگی با نرخ بیشتری کاهش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان افزایش محصولات خوردگی و تاثیر آن بر مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور و کاهش سطح مقطع بیشتر آرماتور دانست. در ادامه روند خوردگی باید به شیب نزولی در درصدهای خوردگی بالاتر توجه کرد که به دلیل کاهش سطح مقطع آرماتور و تسلیم سریعتر آن منجر به تغییر مد شکست از حالت خمشی به برشی با سرعت بیشتری می‌گردد. بنابراین می‌توان دریافت که با افزایش قطر آرماتور، فرآیند خوردگی تاثیر مخرب‌تری بر منحنی

ظرفیت باربری-خیز وسط دهانه دارد، به گونه‌ای که سرعت ترد شدگی تیر بتن مسلح در آرماتورهای با قطر بزرگتر در درصدهای بالای خوردگی بیشتر است.

۶-۷-نتایج بدست آمده از تاثیر مقاومت بتن بر مقاومت خمشی تیر تحت اثر خوردگی

به منظور بررسی تاثیر مقاومت بتن بر مقاومت خمشی تیر تحت اثر خوردگی با توجه به روابط ارائه شده در فصل سه از بتن‌های با مقاومت متفاوت استفاده شده است. در شکل ۶-۱۷ میزان نسبت ظرفیت باربری، با توجه به درصدهای خوردگی (۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) به ظرفیت باربری در حالت بدون خوردگی و تنش فشاری بتن (۲۵، ۲۸٫۶ و ۳۰٫۹) مگاپاسکال، در تیر بتن مسلح با آرماتورهای کششی به قطر ۱۴ میلی‌متر مقایسه شده است.



شکل (۶-۱۷) تاثیر مقاومت بتن در نمودار نسبت بار نهایی-درصد خوردگی آرماتور در تیر خمشی با آرماتورهای کششی به قطر ۱۴ میلی‌متر

با بررسی تغییرات ظرفیت باربری، مشاهده می‌شود که افزایش مقاومت بتن تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر ظرفیت باربری در درصدهای مختلف خوردگی ندارد.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱-مقدمه

سازه‌های بتن مسلح از جمله مصالح سازه‌ای هستند که استقبال خوبی به استفاده از این مصالح در ساخت و ساز گردیده است و تنها محدود به سازه‌های موجود در خشکی نیست، بلکه بسیاری از سازه‌های ساحلی و فراساحلی را می‌توان نام برد که در ساخت آن‌ها از بتن مسلح استفاده شده است.

متاسفانه اکثر سازه‌های بتن مسلح با مشکلاتی از قبیل شکست پیوستگی و خوردگی آرماتورها روبه‌رو شده‌اند و این موضوع تا جایی پیشرفت کرده که بسیاری از این سازه‌ها در زمانی کمتر از عمر طرح در نظر گرفته شده دچار خرابی‌های بسیار جدی می‌گردند.

این پژوهش با هدف ایجاد یک مدل عددی با قابلیت پیش‌بینی رفتار تیرهای بتن مسلح تحت اثر فرآیند خوردگی با استفاده از روش اجزای محدود صورت پذیرفته است. بدین منظور تحلیل عددی نمونه‌ی تیر بتن مسلح تحت فرآیند خوردگی ، مربوط به آزمایش بیرون کشیدگی آرماتور از داخل بتن تاندلو و آزمایش خمش سه نقطه‌ای گو و همکاران توسط نرم‌افزار آباکوس (نسخه ۱-۱۴-۶) انجام گرفت. نتایج اجزای محدود تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. در ادامه با استفاده از چند مدل عددی، پارامترهای افزایش قطر آرماتور و مقاومت بتن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت که نتایج آن ارائه می‌گردد.

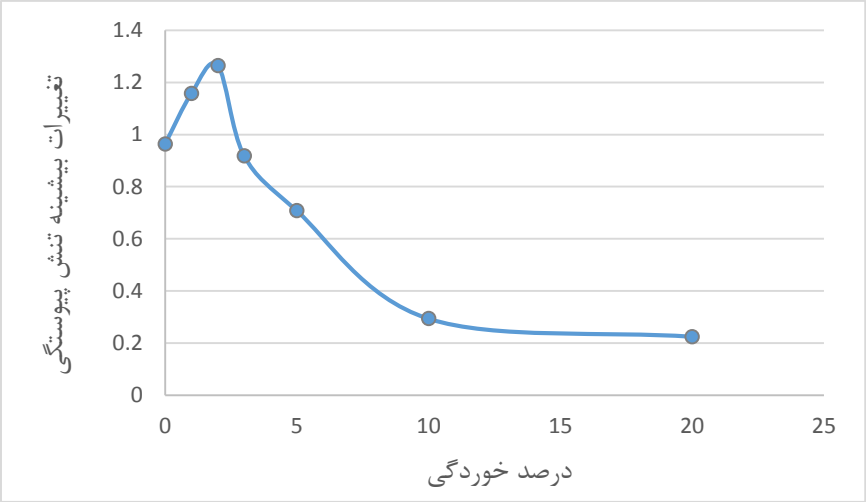
۷-۲-نتیجه‌گیری

بر پایه بررسی‌های انجام شده نتایج کلی این پژوهش عبارتند از:

۱- با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی، روش المان Bond-Link به عنوان روشی مناسب جهت مدلسازی رفتار غیر خطی پیوستگی بتن و آرماتور می‌باشد و نتایج از همگرایی قابل قبولی برخوردار است.

۲- با شروع فرآیند خوردگی تا حدود ۲٪، انبساط حجمی محصولات ناشی از خوردگی آرماتورها، فشاری را به پوشش بتنی اطراف آرماتور وارد می‌نماید که منجر به افزایش مقاومت پیوستگی

بین بتن و آرماتور به میزان ۲۶٪ می‌گردد.



شکل (۷-۱) تغییرات بیشینه تنش پیوستگی با افزایش درصد خوردگی در آزمایش Pull-out

۳- به طور کلی افزایش روند خوردگی منجر به ایجاد فشار چشمگیری ناشی از انبساط حجمی محصولات خوردگی و ترک‌خوردگی پوشش بتنی اطراف آرماتور می‌گردد، به طوری که روندی نزولی در مقاومت پیوستگی بتن و آرماتور به دلیل نفوذ محصولات خوردگی در لابه‌لای ترک‌ها منجر می‌شود. با افزایش شدت خوردگی، ترک‌های ایجاد شده عمیق‌تر می‌شوند که نتیجه‌ی آن کاهش مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور است.

۴- با توجه به همگرایی حاصل شده از مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی توسط لاندگرین جهت مدلسازی فرآیند خوردگی از دقت قابل قبولی برخوردار است.

۵- با در نظر گرفتن ملزومات طراحی، افزایش درصد خوردگی موجب کاهش ظرفیت باربری نهایی در آزمایش خمش سه نقطه‌ای تیر بتن مسلح می‌گردد.

۶- با افزایش درصد خوردگی از شیب تغییرات کاهش ظرفیت باربری نهایی کاسته می‌شود، یا به عبارت دیگر در درصدهای خوردگی ابتدایی تاثیر کاهش ظرفیت باربری نهایی بیشتر است.

۷- افزایش درصد خوردگی منجر به کاهش شکل‌پذیری تیر بتن مسلح و تغییر مد شکست خمشی

به مد شکست ترد می‌گردد.

۸- با افزایش درصد خوردگی تا حدود ۵٪، هر چقدر که سطح مقطع آرماتور بزرگ‌تر انتخاب شود، کاهش ظرفیت باربری با شدت بیشتری صورت می‌گیرد.

۹- با افزایش درصد خوردگی، افزایش مقاومت بتن تاثیری بر ظرفیت باربری نهایی تیر بتن مسلح ندارد.

۷-۳- پیشنهادات

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، برای ادامه تحقیقات در زمینه بررسی رفتار پیوستگی تیرهای بتن مسلح تحت اثر خوردگی موارد ذیل پیشنهاد می‌گردد.

۱- بررسی اثر محصورشدگی اطراف آرماتور در درصدهای مختلف خوردگی

۲- بررسی اثر خوردگی آرماتورهای برشی به همراه آرماتورهای اصلی بر رفتار تیرهای بتن مسلح

۳- بررسی اثر طول پیوستگی در درصدهای مختلف خوردگی بر رفتار تیرهای بتن مسلح

۴- بررسی رفتار تیر بتن مسلح در درصدهای مختلف خوردگی تحت اثر بار سیکلی (آزمایش خستگی)

۵- مقایسه‌ی رفتار تیر بتن مسلح تحت خوردگی موضعی با خوردگی یکنواخت

۶- بررسی تاثیر خلل و فرج بتن (ناهمگنی بتن) بر رفتار پیوستگی تیرهای بتن مسلح تحت اثر خوردگی

منابع:

[۱] A. A. Elbusaefi, “The effect of steel bar corrosion on the bond strength of concrete manufactured with cement replacement materials,” Cardiff University, 2014.

[۲] X. Liang, “An investigation of bond-slip behavior of reinforcing steel subjected to inelastic strains,” 2013.

[۳] M. R. Esfahani and B. V. Rangan, “Bond between normal strength and high-strength concrete (HSC) and reinforcing bars in splices in beams,” *ACI Structural Journal,* vol. 95, pp. 272-280, 1998.

[۴] Z. Achillides and K. Pilakoutas, “FE modelling of bond interaction of FRP bars to concrete,” *Structural Concrete,* vol. 7, pp. 7-16, 2006.

[۵] K. M. A. Hossain and M. Lachemi, “Bond behavior of self-consolidating concrete with mineral and chemical admixtures,” *Journal of Materials in Civil Engineering,* vol. 20, pp. 608-616, 2008.

[۶] D. A. Abrams, “Tests of bond between concrete and steel,” 1913.

[۷] D. Darwin, M. L. Tholen, E. K. Idun, and J. Zuo, “Splice strength of high relative rib area reinforcing bars,” *ACI Structural Journal,* vol. 93, 1996.

[۸] M. R. Esfahani and M. R. Kianoush, “Development/splice length of reinforcing bars,” *ACI structural journal,* vol. 102, 2005.

[۹] P. M. Ferguson, R. D. Turpin, and J. N. Thompson, “Minimum bar spacing as a function of bond and shear strength,” in *ACI Journal Proceedings*, 1954.

[۱۰] P. M. Ferguson, J. E. Breen, and J. N. Thompson, “Pullout tests on high strength reinforcing bars,” in *ACI Journal Proceedings,* 1965.

[۱۱] J. Chinn, P. M. Ferguson, and J. N. Thompson, “Lapped splices in reinforced concrete beams,” in *ACI Journal Proceedings*, 1955.

[۱۲] H. H. Abrishami and D. Mitchell, “Analysis of bond stress distributions in pullout specimens,” *Journal of Structural Engineering,* vol. 122, pp. 255-261, 1996.

[۱۳] S. Viwathanatepa, E. Popov, and V. Bertero, “Effects of generalized loadings on bond of reinforcing bars embedded in well confined concrete,” in *Report no. EERC 79/22*, ed: Earthquake Engineering Center Berkeley, 1979.

[۱۴] D. Darwin and E. K. Graham, “Effect of deformation height and spacing on bond strength of reinforcing bars,” *ACI Structural Journal,* vol. 90, 1993.

[۱۵] J. Zuo and D. Darwin, “Splice strength of conventional and high relative rib area bars in normal and high-strength concrete,” *ACI structural Journal,* vol. 97, 2000.

[۱۶] S. Soretz and H. Holzenbein, “Influence of rib dimensions of reinforcing bars on bond and bendability,” in *ACI Journal Proceedings*, 1979.

[١٧] G. Rehm, “The fundamentals of bond between steel reinforcement and concrete,” *Deutsche association for steel reinforcement-concrete,* p. 59, 1961.

[١٨] L. A. Lutz and P. Gergely, “Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete,” in *ACI Journal Proceedings,* 1967.

[١٩] T. P. Tassios, “Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions,” *Bulletin d’information du CEB,(131),* pp. 65-122, 1979.

[٢٠] R. Tepfers, “Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars,” *Magazine of Concrete Research,* vol. 31, pp. 3-12, 1979.

[٢١] H. Stang, Z. Li, and S. Shah, “Pullout problem: stress versus fracture mechanical approach,” *Journal of Engineering Mechanics,* vol. 116, pp. 2136-2150, 1990.

[٢٢] F. Aslani and S. Nejadi, “Bond behavior of reinforcement in conventional and self-compacting concrete,” 15, Advances in Structural Engineering, 2012.

[٢٣] S. Glasstone, “An introduction to electrochemical behavior of steel in concrete,” *ACI Structural Journal,* p. 12, 1964.

[٢٤] Z. P. Bazant, “Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—theory,” *Journal of the Structural Division,* vol. 105, pp. 1137-1153, 1979.

[٢٥] A. M. Neville, *Properties of concrete*, 1995.

[٢٦] D. Coronelli, “Corrosion cracking and bond strength modeling for corroded bars in reinforced concrete,” *ACI Structural Journal,* vol. 99, pp. 267-276, 2002.

[٢٧] A. Ghosh, “Modeling the bond stress at steel-concrete interface for uncorroded and corroded reinforcing steel,” *Ann Arbor,* vol. 1050, pp. 48106-1346, 2004.

[٢٨] C. Fang, K. Gylltoft, K. Lundgren, and M. Plos, “Effect of corrosion on bond in reinforced concrete under cyclic loading,” *Cement and Concrete Research,* vol. 36, pp. 548-555, 2006.

[٢٩] F. Shang, X. An, T. Mishima, and K. Maekawa, “Three-dimensional nonlinear bond model incorporating transverse action in corroded RC members,” *Journal of Advanced Concrete Technology,* vol. 9, pp. 89-102, 2011.

[٣٠] G. Al-Sulaimani, M. Kaleemullah, and I. Basunbul, “Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members,” *ACI Structural Journal,* vol. 87, 1990.

[٣١] P. S. Mangat and M. S. Elgarf, “Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement,” *Structural Journal,* vol. 96, pp. 149-158, 1999.

[۳۲] A. A. Almusallam, A. S. Al-Gahtani, and A. R. Aziz, “Effect of reinforcement corrosion on bond strength,” *Construction and building materials,* vol. 10, pp. 123-129, 1996.

[۳۳] K. Bhargava, A. Ghosh, Y. Mori, and S. Ramanujam, “Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete—Analytical and empirical models,” *Nuclear Engineering and Design,* vol. 237, pp. 1140-1157, 2007.

[۳۴] Y. A. Mansoor, and Z. Q. Zhang, "The Reinforcement Bond Strength Behavior under Different corrosion," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(7), pp. 2346-2353, 2013.

[۳۵] F. Tondolo, “Bond behaviour with reinforcement corrosion,” *Construction and Building Materials*, 2015.

[۳۶] K. Lundgren, “Bond between ribbed bars and concrete. Part 2: The effect of corrosion,” *Magazine of Concrete Research,* vol. 57, pp. 383-396, 2005.

[۳۷] K. Phuvoravan, "Effect of steel corrosion level on flexural behavior of reinforced concrete beam", Lecturer, Faculty of engineering, Kasetsart university, Bangkok, Thailand, 2010.

[۳۸] I. Sæther and B. Sand, “FEM simulations of reinforced concrete beams attacked by corrosion,” *ACI Structural Journal,* vol. 109, pp. 15-31, 2012.

[۳۹] جاهد مطلق، حمیدرضا، نوبان. محمدرضا و اشراقی. محمدامین، ۱۳۸۳، "اجزاء محدود (ANSYS)" چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.

[۴۰] طلایی طبا، سید بهزاد، "افزایش شکل‌پذیری اتصلات بتن آرمه با استفاده از ورقه‌های FRP" پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، پاییز ۱۳۸۲.

[۴۱] D. Kachlakev, T. Miller, S. Yim and Chansawat, “Finite Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates,” Final Report for Oregon Department of Transportation Research Group, Internet File, 2001.

[۴۲] سروش نیا س.، بهشتیان ن.؛کامل‌ترین مرجع علمی آباکوس، چاپ پنجم، انتشارات نگارنده دانش، تهران، ۱۳۹۱.

[۴۳] Systemes D. Systemes, “Abaqus 6.10 {Analysis User's Manual}, Volume II Analysis Procedures, Solution and Control, ” ed: Dassault Systemes, Las Vegas, NV, USA, 2010.

[۴۴] P.A. Vermeer, R. De Borst, “Non-associated plasticity for soil,concrete and rock,” Vol. 29, Nr. 3, 1984.

[۴۵] پیش‌بینی رفتار بتن محصور در کامپوزیت FRP به روش اجزا محدود، داوود مستوفی نژاد، حسن

سعادتمند، نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۲, جلد ۱۸, تابستان ۱۳۸۶.

[۴۶] B. L. Wahalathantri, D. Thambiratnam, T. Chan and S. Fawzia, “A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS,” Proceedings of the First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing, Queensland University of Technology, 260-264, 2011.

[۴۷] D.Ngo, and A.Scordelis, “Finite element analysis of reinforced concrete beams,” ACI Journal Proceedings. Vol.64. No. 3,1967.

[۴۸] P. Kmiecik and M. Kamiński, "Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration," *Archives of civil and mechanical engineering,* vol. 11, pp. 623-636, 2011.

[۴۹] Z. Guo, “Strength and Deformation of Concrete,” China, Beijing, Tsinghua University Press House, 1997.

Abstract

The corrosion of reinforcement bars embedded in concrete is regarded as the most important factor in reducing durability of RC structures in aggressive environments such as marine environments. Study on corrosion mechanism indicates that corrosion products are accumulated around reinforcement in RC structures by passing time and increasing corrosion's speed. This phenomenon reduces the bond strength between concrete and reinforcement bars; therefore, it causes deterioration in structures under service load. In this study, the effect of corrosion on the bond strength of RC structures is investigated via Finite Element Method (FEM) for which ABAQUS software was employed.

First, a pull-out specimen and a three-point bending test of an RC beam were modeled. Numerical results of this model were compared with the test results. After acquisition of the convergence between the model and experimental results, the effect of different corrosion levels were studied by considering nonlinear behavior of bond strength in reinforced concrete. Results revealed that the ultimate bond strength of RC structures is strongly affected by corrosion levels. Although the ultimate bond strength is increased by starting corrosion procedure, significant reduction in bond strength is observed in further progression of corrosion.

Keywords: Reinforced concrete structures, Corrosion, Bond strength, Nonlinear analysis, Pull-out test, Three-point load flexural test, RC Beam.

Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering
M.Sc. Thesis in Structural Engineering

Nonlinear analysis on the bond strength in reinforcement concrete beam as a function of corrosion level

By: Armin Mokaram

Supervisor:
Dr. F. J. Alaee

Advisor:
M.Sc. M. J. Mirzaee

September 2016