

تحلیل غیر خطی و طراحی لرزه‌های سازه‌های بتن مسلح

ترجمه و تالیف
آرش رستمی



نشر علم عمران

www.elme-omran.com
Info@elme-omran.com

عضو:



انجمن فنی‌نگاری نشران کتاب‌نگاری

این اثر مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هر کس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر و مؤلف، نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

سرشناسه	: رستمی، آرش، ۱۳۶۸، گردآورنده و مترجم
عنوان و نام پدیدآور	: تحلیل غیرخطی و طراحی لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح، ترجمه و تالیف آرش رستمی.
مشخصات نشر	: تهران: علم عمران، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	: ۳۰۰ ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۲۸۰۰۰۰ ریال 978-600-5176-37-7
یادداشت	: کتاب حاضر از " Seismic design aids for nonlinear analysis of reinforced concrete structures, c2010
موضوع	: Earthquake resistant design، ساختمانهای ضد زلزله.
موضوع	: Reinforced Concrete Construction، ساختمان سازی با بتن مسلح.
موضوع	: Nonlinear theories, structural analysis، تحلیل سازه، نظریه‌های غیر خطی.
شناسه افزوده	: چاندراسکاران، سری نیواسان.
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۶ ت ۳/۵ر/۴۴/۴۴ TA۶۵۸
رده بندی دیویی	: ۶۲۷/۱۸۳۴۱
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۹۳۷۳۳۹



نشر علم عمران

تحلیل غیرخطی و طراحی لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح
ترجمه و تالیف: آرش رستمی

چاپ اول پاییز ۱۳۹۶
چاپ پرستش
تعداد و قطع صفحات ۳۰۰ صفحه وزیری
شمارگان ۱۰۰۰
بهای کتاب ۲۸۰۰۰۰ ریال
شابک ۹۷۸-۶۰۰-۵۱۷۶-۳۷-۷ ISBN 978-600-5176-37-7

نشر علم عمران: تهران، یوسف آباد، خیابان جهان‌آرا، بین خیابانهای ۱۶ و ۱۸، پلاک ۳۳، طبقه دوم، واحد ۱۱

تلفن: ۳۱-۸۸۳۵۳۹۳۰ دورنگار: ۸۸۳۵۳۹۳۲

حقوق چاپ و نشر برای نشر علم عمران محفوظ است.

مقدمه ناشر

بی‌شک رشد و توسعه هر کشوری وابسته به میزان فرهنگ، اطلاعات و دانش افراد آن است. از ابزارهای توسعه دانش، تولید کتاب، مقالات، پایان‌نامه‌ها،... می‌باشد. در این راستا رسالت مؤسسات نشر بسیار مهم و اساسی است. نشر علم عمران به عنوان یک مرکز تخصصی جهت ارائه کتاب‌های تخصصی مهندسی عمران همواره سعی داشته تا در این زمینه با کمک فرهیختگان، اساتید و دانشجویان مجرب بتواند گام‌های اساسی در زمینه توسعه دانش مهندسی عمران و توسعه ساخت و آبادانی از طریق گسترش دانش بپردازد.

کتاب حاضر که توسط آقای مهندس آرش رستمی دانشجوی دکترای سازه به رشته تحریر درآمده است، از جمله کتابهای تخصصی در زمینه رفتار غیرخطی سازه‌های بتن مسلح در هنگام زلزله بوده و می‌تواند مرجع مناسبی برای علاقمندان به این موضوع باشد.

سیدمهدی داودنپی

مدیر نشر علم عمران

زندگی صحنه یکتای هنرمندی ماست

هرکسی نغمه خود خواند و از صحنه رود

صحنه پیوسته به جاست

خرم آن نغمه که مردم بسیار ندیده یاد...

با توجه به سرمایه گذاری شخصی در چاپ کتاب کلیه درآمدها حاصل از فروش کتب به موسسات خیریه «حمایت از بیماران کلیوی» و «مهرانه» اهدا می‌گردد.

با سپاس از وجود مقدس

پدرانمان

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم

مادرانمان

مویشتان سپید شد تا ما روشن شوید شویم

آرش رستمی

پیشگفتار مؤلف

در بازبینی‌های اخیر بر روند طراحی حالت حدی اعضای بتن مسلح تأکید بیشتر بر روش مبتنی بر عملکرد می‌باشد. این روش طراحی لرزه‌ای نیازمند درک صحیحی از رفتار غیرخطی اعضا می‌باشد. با توجه کمبود مراجع معتبر در زمینه آنالیز و طراحی لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح با رویکرد عملکردی در کشور و نیاز دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری و همچنین جامعه مهندسين به مفاهيم بنيادين مربوطه نويسندگان را بر آن داشت تا به تدوين مجموعه‌ای در این زمینه همت گمارند. عمده مطالب کتاب حاضر از کتاب «Seismic Design Aids for Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures» اقتباس شده است. در کتاب حاضر با توجه به مثال‌ها و برنامه‌های کامپیوتری تلاش شده پیچیدگی‌هایی که در ارزیابی برخی پارامترهای ورودی پایه برای آنالیزهایی غیرخطی مورد نیاز میباشد، ساده سازی و شفاف سازی نماید. لزوم طراحی ایمن سازه بدلیل افزایش در خسارت ساختمان‌ها در طی زلزله‌های اخیر در حال تبدیل شدن به یک نگرانی و دلواپسی قابل ملاحظه در نزد جامعه مهندسی می‌باشد. اکثر ساختمان‌های موجود با آیین‌نامه‌های موجود جوابگو نبوده و لذا لازم است که ایمنی سازه ای آنها ارزیابی گردد و به سوالاتی که در ارتباط با ایمنی سازه ای آنها ایجاد شبهه می نماید دارای پاسخ شفاف باشد. برای اکثر این ساختمان‌ها لازم است تا از شکست سازه ای جلوگیری گردد هرچند وقوع خسارات محدود معمولاً مورد پذیرش می باشد. به عنوان یک واقعیت مهم باید اذعان داشت که آنالیز غیرخطی سازه ای یک ابزار پایه و اساسی برای سی سال پیش بوده است لیکن به صورت وسیعی در دروس دانشگاهی بدان اشاره نشده بود و از این رو اکنون توسط مهندسين سازه براهتی بکار گرفته نمی شود. به عبارت دیگر گسترش برنامه‌های آنالیز سازه ای کامپیوتری مهندسين را به سمت یک طرز برخورد انفعالی سوق داده به نحوی که در عمل با تصدیق و اعتبارسنجی کامل پروسه طراحی در تضاد میباشد. روشهای آنالیز غیرخطی شبیه پوش

اور استاتیکی معمولاً مورد پذیرش بوده و به عنوان یک ابزار مورد اعتماد جهت ارزیابی لرزه ای ساختمان‌ها توسط آیین نامه‌های بین المللی توصیه می گردد، لیکن دقت تخمین ظرفیت لرزه ای شدیداً به پارامترهای ورودی این چنین آنالیزهایی وابسته می باشد. برخی از ورودی‌های پایه نظیر اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی تسلیم، لنگر- انحناء و مشخصات لنگر- دوران که برای رفتار غیرخطی مناسب مصالح پایه المان‌های بتن مسلح لحاظ می گردند، نیازمند بازبینی مجدد جهت انجام یک آنالیز پوش اور دقیق است. احساس می شود که استفاده مناسب از خصوصیات غیرخطی مصالح پایه برای مهندسین طراح در حین به کارگیری نرم افزارها چندان مرسوم نمی باشد. مهندسین تمایل دارند که از خصوصیات از پیش تعیین شده مصالح بعنوان ورودی آنالیز غیرخطی استفاده نمایند بدون اینکه درک نمایند یک تغییر جزئی و کوچک در مشخصات غیرخطی مصالح پایه نظیر بتن و فولاد می تواند به راه حل غیر رضایت بخش منجر گردد و در نهایت به ارزیابی و تفسیر اشتباه منتهی می گردد. دلیل اصلی عدم توجه یاد شده می تواند از پیچیدگی‌های ذاتی خصوصیات بتن مسلح ناشی گردد که استخراج و بکارگیری خصوصیات مذکور، ساختار پایه ای برای آنالیز غیرخطی می باشد.

کتاب حاضر مشتمل بر پنج بخش میباشد الف) اندرکنش نیروی محوری- لنگر خمشی تسلیم ب) رابطه لنگر خمشی - انحناء ج) مشخصات لنگر خمشی - دوران برای تیرهایی با شرایط تکیه گاهی و بارگذاری مختلف د) ضرایب خرابی بارهای لرزه ای برای سازه‌های قابی شکل منظم با استفاده از تئوری‌های پلاستیک و با استفاده از تئوری تحلیل حدی کران بالا و کران پایین ه) تصدیق قانون جریان پلاستیک برای دامنه‌های اندرکنشی نیروی محوری- لنگر خمشی توسعه یافته. یک مدل ریاضی اندرکنش P-M تیرهای بتن مسلح با مقطع مستطیلی با جزئیات کامل و بر مبنای آیین نامه‌های بین المللی نظیر یوروکد با معرفی زیر دامنه‌ها و مرزها و همچنین مجموعه عبارات تحلیلی در بخش اول کتاب پیشنهاد شده است. روابط لنگر خمشی- انحناء تیرها (فاقد نیروی محوری) و ستون‌ها (با لحاظ نمودن سطوح مختلف نیروهای محوری) در بخش دوم کتاب ارائه شده است. در بخش سوم کتاب برای لنگر- دوران و نسبت‌های شکل پذیری برای هر مکانیسم شکست و گسترش مفاصل پلاستیک عبارات تحلیلی کامل ارائه شده است و برخی از موارد کاربردی تیرها با شرایط بارگذاری و تکیه گاهی ارائه شده است. در بخش چهارم با تعیین ضرایب بار شکست با استفاده از تئوری پلاستیک برای مثال‌های متنوعی از قاب‌ها که به صورت معمول و به صورت تیپ تیر ضعیف - ستون قوی منظور می گردند، سرو کار خواهیم داشت. مدلسازی تحلیلی توسعه یافته اندرکنش P-M با استفاده از قانون جریان پلاستیک در بخش پنجم مورد تصدیق و تایید قرار می گیرد. هرچند خصوصیات مصالح در کتاب حاضر محدود به آیین نامه‌های بین المللی مشخصی می باشند لیکن خواننده می تواند به آسانی به استخراج عبارات

مورد نیاز که با آیین نامه بین المللی انتخابی دیگر تطابق دارد، بپردازد. این امر با جایگزین کردن تعداد معادلات محدود که خصوصیات مصالح را بیان می‌نماید با ارائه گام به گام استخراج عبارات در بخش‌های مربوطه امکان پذیر است. به سادگی می‌توان به عبارات مورد نظر دست یافت با این وجود با استفاده از الگوریتم مشابه این اطمینان وجود دارد که مهندسین طراح و محققین به سادگی می‌توانند موارد دیگری که در این کتاب بدان اشاره نشده است، بدان دست یابند.

همچنین یک روش گام به گام جهت انجام آنالیز پوش اور یک مثال قابی شکل با استفاده از منحنی‌های طراحی پیشنهادی و جداول به عنوان پارامترهای ورودی ارائه شده است. دو رابطه بسیار ساده برای کران‌های بالا و پایین ضرایب بار لرزه‌ای برای قاب‌های منظم تیپ تیر ضعیف - ستون قوی پیشنهاد شده است. مطابق پیش بینی انطباق مناسبی با مقادیر حاصل از آنالیز پوش اور برای قاب‌های منظم سازه‌ای مورد تحلیل دارا می‌باشند. اطلاع از ضرایب استاتیکی که بر مبنای یک شیوه تحلیلی ساده بنا شده هم برای ارزیابی لرزه‌ای و هم طراحی لرزه‌ای مفید می‌باشد زیرا سازه تحت بارهای لرزه‌ای که با کران پایین استاتیکی تشدید یافته اند، ایمن خواهد بود. برنامه‌های کامپیوتری مورد استفاده برای بهینه سازی غیرخطی ضرایب شکست با استفاده از تئوری استاتیکی و همچنین جهت تعیین ضرایب کینماتیکی در CD ضمیمه ارائه شده است. با استفاده از این برنامه به آسانی جهت تعیین ضرایب برای حالات مختلف می‌توان داده‌های ورودی را اصلاح نمود. ضرایب کینماتیکی و استاتیکی برای بارهای شکست قاب‌ها با نتایج حاصل از روش پوش اور استاتیکی غیرخطی مقابسه شده اند تا سطح اطمینان نتایج حاصل از آنالیز حدی را نشان دهند. جداول و منحنی‌های طراحی برای ترکیبات مناسب ابعادی سطح مقطع تیرها و ستونها با مجموعه‌ای از صد آرماتورهای کششی و فشاری که به صورت مرسوم در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد، پیشنهاد شده است. کتاب حاضر جهت ارزیابی ظرفیت المان‌های بتن مسلح که دارای سطح مقطع مشخص بوده و همچنین جهت انجام آنالیز غیرخطی با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری در دسترس، بسیار مفید می‌باشد. گام‌های لازم جهت استفاده از برنامه‌هایی که در قالب فایل EXCELL و در CD ضمیمه ارائه شده است، در انتهای هر بخش ارائه شده است. نویسندگان امیدوارند کتاب حاضر به عنوان یک مرجع مفید در دروس و دوره‌های پیشرفته طراحی لرزه‌ای سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

از جناب طالقانی مدیریت محترم انتشارات انتشارات سیمای دانش که نسبت به چاپ، نشر و توزیع کتاب عنایت ویژه داشتند تشکر و سپاسگزاری می‌کنیم. همچنین از خانم سارا رستمی (کانون تبلیغات نقش واره) که زحمت تایپ، صفحه آرایی و طراحی جلد را بر عهده داشتند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نماییم. هرچند طی بازخوانی‌های مکرر سعی و تلاش فراوان به عمل آمده تا کتاب حاضر از حداقل اشتباهات برخوردار باشد، لیکن باور داریم این اثر دارای لغزش‌ها و

کاستی‌هایی است پیشاپیش از خوانندگان محترم به لحاظ وجود اشتباهات و اشکالاتی که از نظر دور مانده صمیمانه پوزش می‌خواهیم.
دریافت نقطه نظرات، پیشنهادات و رهنمودهای همکاران محترم، دانشجویان عزیز و مهندسان گرامی موجب قدردانی و سپاسگزاری است.

آرش رستمی

مقدمه چاپ و ویرایش دوم

به نام یگانه مهندس گیتی

در چاپ و ویرایش اول کتاب «تحلیل غیرخطی و طراحی لرزه ای سازه های بتن مسلح» که برای اولین بار در کشور چنین کتابی با چنین محتوایی چاپ شد مورد استقبال خیل عظیمی از مهندسين، دانشجویان و اساتید قرار گرفت. در ویرایش دوم تغییرات خاصی در محتوا انجام نشده است و فقط چند رابطه که در چاپ اول وجود داشت تصحیح گشته اند. پس از اتمام کتاب و با توجه به اینکه در کشور عزیزمان بیشتر ساختمان ها با نوع بتن آرمه طراحی و ساخته می شوند اینجانب را بر آن داشت تا با کمک یکی از دوستان جناب آقای مهندس مرتضی عسکری زیارتی کتاب هایی با محتوای تحلیل غیر خطی سازه های بتن آرمه تهیه و تدوین نمایم. در این مجموعه از کتب مرتبط با تحلیل غیرخطی سازه های بتن آرمه کتبی با عنوان «عملکرد لرزه ای سازه های بتن آرمه» و نیز «تحلیل غیرخطی سازه های بتنی به روش مفصل پلاستیک با استفاده از SAP2000 و OPENSEE» در حال تدوین بوده که در مدت زمان کوتاهی به بازار خواهد آمد و نیاز دانشجویان و مهندسين را تا حد زیادی اقماع خواهد نمود.

در پایان نیز دوستانی در تدوین کتاب قبول زحمت نمودند من جمله سرکار خانم رستمی (کانون تبلیغاتی نقش واره) و جناب آقای دکتر داودنبي مدير مسوول انتشارات علم عمران که در طول تدوین کتاب کمک های بی پایانی به اینجانب نمودند تشکر می نمایم. به مثابه دیگر کتب این اثر مبرا از اشتباهات نمی باشد لذا از خوانندگان و دانشجویان محترم تقاضا داریم نقطه نظرات خود را به ایمیل آدرس Civil.Rostami.Books@gmail.com ارسال کرده و فایل های مرتبط با کتاب را از وبسایت شخصی اینجانب به آدرس www.ArashRostami.com دانلود نمایند.

آرش رستمی

مهر ماه ۱۳۹۶

فهرست مطالب

۱۷	فصل اول: اندرکنش گسیختگی نیروی محوری-لنگر خمشی
۱۹	۱-۱. خلاصه
۲۰	۲-۱. مقدمه
۲۲	۳-۱. توسعه ریاضی
۲۵	۴-۱. شناسایی زیر دامنه‌ها
۲۵	۱-۴-۱. زیر دامنه‌های ۱ و ۲: خرابی ناشی از تسلیم آرماتورها
۳۲	۲-۴-۱. زیر دامنه‌های ۳ تا ۶: خرابی ناشی از خرد شدگی بتن
۳۴	۵-۱. مطالعات عددی و بحث‌های مربوطه
۶۳	۶-۱. نتیجه گیری
۶۳	۷-۱. روش عددی در فرمت صفحه گسترده
۶۵	فصل دوم: روابط لنگر-انحناء برای مقاطع بتن آرمه
۶۷	۱-۲. خلاصه
۶۷	۲-۲. مقدمه
۶۹	۳-۲. توسعه ریاضی
۷۰	۴-۲. لنگر- انحناء در محدوده الاستیک
۷۱	۱-۴-۲. نیروی محوری کششی
۷۳	۲-۴-۲. فاقد نیروی محوری
۷۳	۳-۴-۲. نیروی محوری فشاری
۷۵	۵-۲. حد الاستیک لنگر خمشی و (انحناء)
۷۵	۱-۵-۲. مورد ۱: کرنش آرماتور کششی به حد تسلیم می‌رسد و تنش در بتن ناپدید می‌گردد
۷۵	۲-۵-۲. مورد ۲: کرنش در فولاد کششی به حد تسلیم می‌رسد اما تنش در بتن وجود دارد
۷۷	۳-۵-۲. مورد ۳: کرنش در آرماتور فشاری به حد الاستیک می‌رسد.
۷۸	۴-۵-۲. مورد ۴: رسیدن کرنش در دورترین تار فشاری بتن به مقدار حدی الاستیک
۸۰	۶-۲. درصد میلگرد برای مقطع متعادل
۸۱	۷-۲. رابطه انحناء لنگر خمشی نهایی
۸۱	۱-۷-۲. موقعیت محور خنثی با فرض مقادیر منفی
۸۲	۲-۷-۲. موقعیت محور خنثی با فرض مقادیر مثبت

۸۸	۸-۲. مطالعات عددی و بحث پیرامون آن
۱۱۲	۹-۲. نتیجه گیری
۱۱۳	۱۰-۲. برنامه صفحه گسترده
۱۱۳	۱۰-۱-۲. روش گام به گام استفاده از برنامه صفحه گسترده ارائه شده در وب سایت
۱۱۷	فصل سوم: رابطه لنگر-چرخش برای تیرهای بتن آرمه
۱۱۹	۱-۳. خلاصه
۱۱۹	۲-۳. مقدمه
۱۲۱	۳-۳. توسعه ریاضی
۱۲۳	۴-۳. روابط تحلیلی لنگر- دوران
۱۲۴	۳-۴-۱. تیر ثابت تحت بار متمرکز مرکزی
۱۳۰	۳-۴-۲. تیر با تکیه گاه ساده تحت بار متمرکز مرکزی
۱۳۴	۳-۴-۳. تیر ثابت تحت توزیع بار یکنواخت
۱۳	۵-۳. مطالعات عددی و مباحث مربوط به آن
۱۴۹	۶-۳. نتیجه گیری
۱۵۰	۷-۳. برنامه صفحه گسترده
۱۵۰	۷-۱-۳. روش گام به گام جهت استفاده از روش عددی در وب سایت
۱۵۱	فصل چهارم: محدوده بارهای خرابی برای قابهای ساختمانی تحت بارهای لرزه‌ای (مقایسه با آنالیز استاتیکی غیرخطی پوش اور)
۱۵۳	۱-۴. خلاصه
۱۵۴	۲-۴. مقدمه
۱۵۵	۳-۴. ضرایب خرابی
۱۵۷	۴-۳-۱. ضریب کینماتیک K_k
۱۵۹	۴-۳-۲. ضریب استاتیکی، K_s
۱۶۲	۴-۳-۳. تحلیل گام به گام برای یک قاب ساده با برهم کنش P-M
۱۶۹	۴-۴. مطالعات عددی و مباحث مربوط به آن
۱۷۶	۵-۴. نتیجه گیری
	فصل پنجم: اعتبارسنجی قانون جریان برای دامنه های اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی
۱۷۷	
۱۷۹	۱-۵. خلاصه
۱۷۹	۲-۵. مقدمه

۱۸۱	۳-۵. بسط و توسعه ریاضی
۱۸۵	۱-۳-۵. زیر دامنه ۱ تا $2b^2$: شکست به علت تسلیم فولاد
۱۹۱	۲-۳-۵. زیر دامنه ۳ تا $6b$: شکست به علت خرد شدن بتن
۱۹۲	۴-۵. کرنش پلاستیک افزایشی در دامنه‌های مختلف
۱۹۸	۵-۵. اعتبارسنجی قانون جریان
۱۹۹	۶-۵. نتیجه گیری
۲۰۹	فصل ششم: برنامه کامپیوتری برای ضرایب خرابی (فروریزش)
۲۱۱	۱-۶. مقدمه
۲۱۲	۲-۶. برنامه نویسی کامپیوتری برای ضرایب فروریزش
۲۱۲	۱-۲-۶. قاب منظم یک طبقه- یک دهانه
۲۱۸	۲-۲-۶. قاب منظم دو طبقه- یک دهانه
۲۱۹	۳-۲-۶. قاب یک طبقه- یک دهانه دارای ستون هایی با طول های غیریکسان
۲۲۱	۴-۲-۶. قاب منظم دو طبقه- چهار دهانه
۲۲۲	۵-۲-۶. قاب نامنظم سه طبقه- شش دهانه
۲۲۴	۶-۲-۶. قاب منظم سه طبقه- شش دهانه
۲۲۶	۷-۲. قاب منظم ده طبقه پنج دهانه
۲۲۹	۸-۲-۶. روش کلی برای قاب‌های منظم با N طبقه- M دهانه
۲۳۵	۹-۲-۶. کدنویسی کامپیوتر برای محاسبه ضرایب فروریزش استاتیکی (LINGO)
۲۳۶	۳-۶. راهکاری جهت انجام تحلیل پوش اور
۲۳۹	۱-۳-۶. روش گام به گام با استفاده از SAP ۲۰۰۰
۲۶۳	منابع

فصل اول

اندرکنش گسیختگی
نیروی محوری-لنگر خمشی

۱-۱. خلاصه

روند طراحی حالت حدی اعضای بتن مسلح در زمان‌های اخیر تحت بازبینی‌های عمده‌ای قرار گرفته است که تأکید آن بیشتر بر روش مهندسی مبتنی بر عملکرد می‌باشد. این روش طراحی نیازمند درک درستی از برهم‌کنش‌ها و اثر متقابل تسلیم نیروی محوری- لنگر خمشی (P-M) اعضا می‌باشد. به خصوص برای قاب‌های بتن مسلح مقاوم در برابر لنگر (RC) که تحت اثر بارهای لرزه‌ای قرار می‌گیرند. روش‌های طراحی موجود هم توسط آیین‌نامه‌های بین‌المللی و هم توسط مهندسان مجرب توصیه شده است که ویژگی‌های مطلوب مقاومت نهایی و روش‌های تنش مجاز^۱ و هم چنین حصول اطمینان از پاسخ شکل‌پذیری را شامل می‌شود. در این فصل مدل‌سازی ریاضی برهم‌کنش‌های گسیختگی (P-M) تیرهای مستطیلی بتن مسلح (RC) بر اساس آیین‌نامه اروپا (یوروکد) که در حال حاضر رایج است با جزئیات ارائه شده است و به شش حوزه (زیر دامنه) که معرف مرزهای برهم‌کنش‌های تسلیم (P-M) می‌باشند؛ طبقه‌بندی شده است. یک مجموعه کامل از عبارات تحلیلی ارائه شده و هم چنین به وسیله مثال‌های مرتبط نمایش داده شده است. نتایج به دست آمده برای منحنی شکست برهم‌کنش‌های (P-M) مقاطع مستطیلی بتن مسلح تحت برهم‌کنش تسلیم با به کارگیری محدوده کرنش آیین‌نامه اروپا بیانگر این است که منحنی مرزی به دو بخش عمده تقسیم شده است، که می‌توان از آنها بدین صورت نام برد:

- I. شکست کششی به همراه آرماتورگذاری ضعیف (کم فولاد) که منجر به تسلیم فولاد می‌شود.
 - II. شکست فشاری به همراه آرماتورگذاری قوی (پر فولاد) که منجر به خرد شدن بتن می‌شود.
- منحنی‌ها به شکل تحلیلی برای هر ترکیب ممکن لنگر خمشی و نیروی محوری ارائه شده‌اند. استفاده سودمند از برهم‌کنش‌های (P-M) مطرح شده برای تحلیل غیرخطی لرزه‌ای در فصلی که در پیش

روست نشان داده شده است. همچنین مرز توسعه یافته زیر حوزه‌های متفاوت برای یک قانون جریان پلاستیک تعریف شده است. با کمک مدل ریاضی ارائه شده و عبارات مطرح شده برای برهم‌کنش‌های تسلیم (P-M)، طراحی سازه‌های جدید و ارزیابی سازه‌های بتن مسلح موجود را می‌توان با درکی مناسب‌تر بهبود و با افزایش دقت انجام داد.

۲-۱. مقدمه

بتن یک ماده ناهمگن دارای خصوصیت چسبندگی- اصطکاکی است که تحت حالات چند محوره تنش رفتار پیچیده غیرخطی از خود بروز می‌دهد. استفاده گسترده از بتن به عنوان مصالح اولیه سازه‌ای در سازه‌های پیچیده گوناگون نیازمند درک جزئیات پاسخ مصالح تحت ترکیبی از بارهای متفاوت است^۱. اطمینان از شکل‌پذیری مناسب در روش‌های طراحی پیش نیاز مهمی است تا سازه بتن مسلح به شکل مناسبی در برابر بارهای لرزه‌ای مقاومت کند^۲. مطلب یاد شده درست و منطقی است زیرا که فلسفه طراحی لرزه‌ای نیازمند این است که در حین زمین‌لرزه‌های بزرگ و عمده جذب/ اتلاف انرژی توسط تغییرشکل‌های پس از مرحله الاستیک (مرحله پلاستیک) برای جلوگیری از خرابی صورت بگیرد. همچنین شکل‌پذیری باز توزیع مؤثر لنگرها را در مقاطع بحرانی به محض رسیدن به بار و خرابی تضمین می‌کند^۳. شکل‌پذیری به عنوان معیاری از اتلاف انرژی با تغییرشکل‌های غیرالاستیک در حین زلزله‌های مهم، به طور عمده به رابطه لنگر- انحناء در مقاطع بحرانی بستگی دارد که در آنها انتظار تشکیل مفاصل پلاستیک در هنگام خرابی می‌رود^۴. سازه‌های بتن مسلح (RC) قابلیت تغییر در محدوده مشخصی را دارا می‌باشند به نحوی که به لنگرهای نهایی مطلوب طراحی بدون تغییر در ابعاد کلی مقطع عرضی دست می‌یابیم. به عنوان یک نتیجه، گاهی اوقات توصیه می‌شود که مساحت آرماتور باید به گونه‌ای تنظیم گردد تا مجبور به باز توزیع لنگر خمشی نهایی در اعضا مشابه با دیاگرام خمشی الاستیک تحت بارهای ضریب دار گردد. این یک جنبه حیاتی از طراحی بر پایه عملکرد (مورد نظر) سازه است، که منجر به مزیت‌های ذیل می‌گردد:

- ۱- تحلیل‌های الاستیک مورد نیاز بسیار دشوارتر خواهند بود.
- ۲- نتیجه طراحی این روش ضوابط عملکردی مورد نیاز را که توسط طراح تهیه و تنظیم شده به خوبی در خود منعکس می‌کند.
- ۳- مفصل‌های پلاستیک مجبور به تشکیل بر روی اعضای سازه‌ای می‌گردد که انتخاب

1. Abu Lebdeh and Voyiadjis 1993, Candappa, Sanjayan, and Setunge 2001, Park and Kim 2003

2. IS 1993, 13920

3. Chandrasekaran, Tripathi, and Srivastav 2003; Chandrasekaran, Serino, and Gupta 2008

4. Park and Paulay 1975; Bangash 1989; Papadrakakis, Fragiadakis, and Lagaros 2007

مطلوب می‌باشد (برای مثال بر روی تیرها و نه روی ستون‌ها). لذا عملکرد مورد نیاز ساختمان‌ها تحت بارهای لرزه‌ای تضمین می‌شود. به عبارت دیگر، سازه‌ها باید قادر باشند که به شکل قابل ارزیابی و اندازه‌گیری در مقابل زلزله‌ها مقاومت کنند و سطح مطلوبی از خسارت محتمل را ارائه نمایند^۱. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد^۲ که رفتار استاتیکی سازه‌های بتن مسلح نامشخص به نسبت آرماتورگذاری بستگی دارد. برای مقادیر کوچک‌تر از این نسبت، آرماتور به حد نهایی (پلاستیک) خود می‌رسد قبل از اینکه بتن در فشار خرد شود و این در حالی است که برای مقادیر بزرگتر، ممکن است خرد شدن بتن قبل از تسلیم آرماتور اتفاق بیفتد. هر چند این نسبت وقتی بحرانی می‌شود که فولاد تحت کشش به حد تسلیم خود برسد و درست در همان لحظه لایه انتهایی فشاری بتن به کرنش خردشدگی خود می‌رسد.

نگرانی رو به افزایشی از ایمنی سازه‌ای ساختمان‌های موجود که با آیین‌نامه‌های لرزه‌ای حاضر هم‌خوانی ندارند نیاز به ارزیابی عملکرد آن‌ها برای سنجش خطر لرزه‌ای‌شان را ایجاب می‌کند که این یک وظیفه مهم را پیش روی طراحان سازه قرار می‌دهد.

بنابراین هدف تخمین وجود ساختمان‌های ایمن، نگرانی‌های اشاره شده در بالا را شدت می‌بخشد^۳ که به این ترتیب تحلیل‌های بار افزون (پوش اور) را می‌توان به عنوان روشی سریع و با دقتی معقول در نظر گرفت. آنالیزهای پوش اور مسئول رفتارهای غیرالاستیک مدل‌های ساختمانی هستند و تخمین معقولی از ظرفیت تغییرشکل به دست می‌دهند^۴ و در عین حال مقاطع بحرانی‌ای را که در طول زلزله احتمال رسیدن آنها به وضعیت حدی وجود دارد مشخص می‌کنند. محققان از آنالیزهای پوش آور با موفقیت برای ارزیابی لرزه‌ای استفاده کرده‌اند و مقایسه آن با سایر راه کارهای تحلیلی را با جزئیات نشان داده‌اند^۵. محققان تأکید کرده‌اند که دقت نتایج بدست آمده از آنالیزهای پوش اور به شدت تحت تأثیر ورودی‌های پایه نظیر:

۱- ارتباط تنش - کرنش مصالح ساختمانی

۲- برهم‌کنش‌های تسلیم P-M و

۳- ظرفیت دوران لنگرهای اعضا^۶ قرار دارد از نگاه کیفیتی به این داده‌ها به خصوص برهم‌کنش‌های P-M، برای سطح مقطع مستطیل شکل دارای سطح مقطع فولاد متفاوت کششی و فشاری به منظور لحاظ نمودن مشخصات غیرخطی مصالح تشکیل دهنده در مقالات نسبتاً غایب می‌باشد.

1. Ganzerli, Pantelides, and Reaveley 2000; Ghobarah 2001

2. Paulay and Priestley 1992

3. ATC40.1996-

4. Chopra and Goel 2000; Chao, Yungting, and Ruo 2006

5. Esra and Gulay 2005; Chandrasekaran and Roy 2006, 2004; Chandrasekaran, Nunzinate, et al. 2008b

6. Chandrasekaran et al. 2008a

در این فصل توسعه ریاضی از رفتار غیرخطی اعضای بتن مسلح ارائه شده و برهم‌کنش‌های تسلیم P-M در حالی که شش زیر حوزه آنها توضیح داده می‌شود، نتیجه گرفته می‌شود.

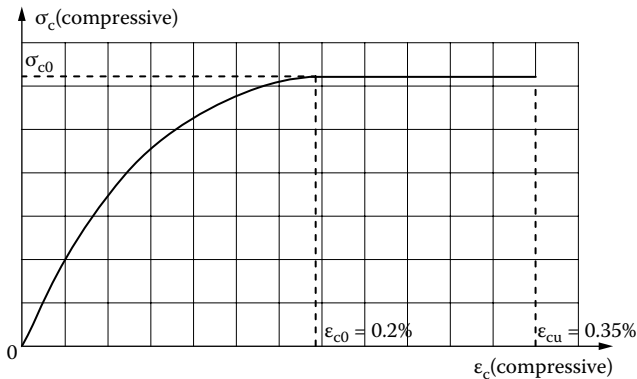
۳-۱. توسعه ریاضی

بتن تحت حالت تنش چند محوره، رفتار غیرخطی محسوسی را بروز می‌دهد که می‌توان با موفقیت با مدل‌های غیرخطی ساختاری باز نمایش داده شود^۱. بسیاری از محققان ضوابط شکست متفاوتی را در فضای تنش توسط تعدادی پارامتر کنترل مستقل گزارش نموده‌اند^۲. پاسخ غیرخطی بتن مطابق شکل (۱-۱) با رابطه تنش- کرنش سهموی مشخصه سازی می‌گردد. کرنش حدی الاستیک و کرنش ترک خوردگی به ترتیب به 0.2% و 0.35% محدود شده‌اند^۳. از تنش‌های کششی بتن در این مطالعه صرف نظر می‌گردد. تنش نهایی طراحی بتن تحت فشار مطابق رابطه ذیل می‌باشد:

$$\sigma_{c0} = \frac{(0.83)(0.85)R_{ck}}{\gamma_c} \quad (1-1)$$

رابطه تنش- کرنش بتن تحت تنش‌های فشاری مطابق رابطه (۲-۱) خواهد بود.

$$\begin{aligned} \sigma_c(\epsilon_c) &= a\epsilon_c^2 + b\epsilon_c + c & 0 < \epsilon_c < \epsilon_{c0} \\ \sigma_c(\epsilon_c) &= \epsilon_{c0} & \epsilon_{c0} < \epsilon_c < \epsilon_{cu} \end{aligned} \quad (2-1)$$



شکل ۱-۱. رابطه تنش- کرنش بتن

1. Hognestad, Hanson, and McHenry 1955; Chen and Chen 1975; Ottosen 1977; Chen 1994a, 1994b
 2. Hsieh, Ting, and Chen 1982; Menetrey and William 1995; Sankarasubramaniam and Rajasekaran 1996; Nunziante, Gambarotta, and Tralli 2007
 3. D.M. 9 gennaio 1996

که مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های فشاری در تحلیل مثبت فرض گردیده‌اند. ثابت‌های a ، b و c در رابطه (۲-۱) با اعمال شرایط زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned} \sigma_c(\varepsilon_c = 0) &= 0 & c &= 0 \\ \sigma_c(\varepsilon_c = \varepsilon_{c0}) &= \sigma_{c0} & \Rightarrow & a\varepsilon_{c0}^2 + b\varepsilon_{c0} = \sigma_{c0} \\ \left[\frac{d\sigma_c}{d\varepsilon_c} \right]_{\varepsilon_c = \varepsilon_{c0}} &= 0 & & 2a\varepsilon_{c0} + b = 0 \end{aligned} \quad (۳-۱)$$

با حل معادلات بالا خواهیم داشت:

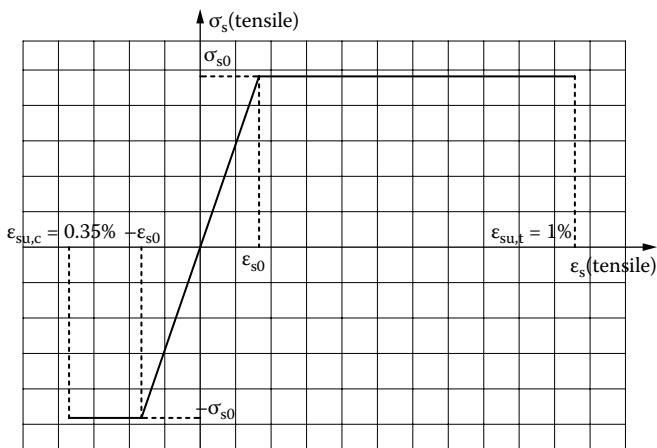
$$a = -\frac{\sigma_{c0}}{\varepsilon_{c0}^2}, \quad b = \frac{2\sigma_{c0}}{\varepsilon_{c0}}, \quad c = 0 \quad (۴-۱) \text{ الف}$$

با جایگذاری در رابطه (۲-۱) خواهیم داشت:

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = -\frac{\sigma_{c0}}{\varepsilon_{c0}^2} \varepsilon_c^2 + \frac{2\sigma_{c0}}{\varepsilon_{c0}} \varepsilon_c, \quad 0 < \varepsilon_c < \varepsilon_{c0} \quad (۴-۱) \text{ ب}$$

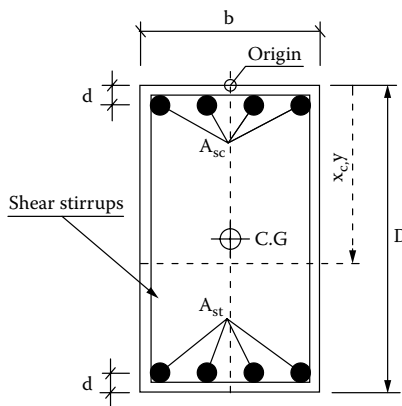
فولاد یک مصالح ایزوتروپیک و همگن است و رابطه تنش-کرنش آن در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. در حالی که کرنش حد نهایی تحت کشش و فشار به ترتیب ۱٪ و ۰٫۳۵٪ لحاظ شده است.^۱ کرنش الاستیک فولاد تحت کشش و فشار یکسان در نظر گرفته شده است. تنش نهایی طراحی فولاد به شکل زیر می‌باشد:

$$\sigma_{s0} = \frac{\sigma_y}{\gamma_s} \quad (۵-۱)$$



شکل ۱-۲. رابطه تنش - کرنش آرماتور

رابطه تنش - کرنش آرماتور به این شکل داده شده است:



شکل ۱-۳. سطح مقطع تیر بتن مسلح

$$\begin{aligned}
 \sigma_s(\epsilon_s) &= E_s \epsilon_s & -\epsilon_{s0} < \epsilon_s < \epsilon_{s0} \\
 \sigma_s(\epsilon_s) &= \sigma_{s0} & \epsilon_{s0} < \epsilon_s < \epsilon_{su,t} \quad (\epsilon_{su,t} = \epsilon_{su}) \\
 \sigma_s(\epsilon_s) &= -\sigma_{s0} & -\epsilon_{su,c} < \epsilon_s < -\epsilon_{s0}
 \end{aligned}
 \tag{۶-۱}$$

رفتار اندرکنشی تسلیم P-M برای تیر بتن مسلح با مقطع مستطیلی نشان داده شده در شکل (۳-۱) تحت نسبت آرماتورهای متفاوت کششی و فشاری ارزیابی می‌گردد. فرضیه بنیادی برنولی در مورد کرنش خطی در کل سطح مقطع، هم برای پاسخهای الاستیک و هم برای پاسخهای

الاستوپلاستیک برای یک تیر تحت لنگر خمشی ترکیب شده با نیروی محوری دارای اعتبار می‌باشد. رفتار اندرکنشی وقتی بحرانی می‌شود که یکی از شرایط زیر اعمال شود: ۱- آرماتورهای کششی به حد نهایی برسند یا ۲- کرنش در تارهای انتهایی فشاری بتن به حد نهایی برسد و یا ۳- کرنش مراکز بتن تحت نیروی محوری فشاری تنها به مقدار حدی الاستیک برسد. دامنه حدی P-M که مشتمل بر ۶ زیر دامنه می‌باشد در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. تنها منحنی‌های بالاترین مرز (مربوط به لنگر خمشی مثبت M) مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت چرا که تقارن شعاعی در دامنه‌ها با توجه به مرکز دامنه وجود دارد. شکل (۵-۱) پروفیل کرنش و تنش در آرماتور و بتن را برای زیر دامنه‌های ۱ و ۲ که در آن خرابی از تسلیم شدن آرماتور نشات می‌گیرد را نشان می‌دهد، در حالی که شکل (۶-۱) بیانگر پروفیل‌های کرنش و تنش برای زیر دامنه‌های ۳ تا ۶ می‌باشد که در آنها خرابی ناشی از خرد شدن بتن می‌باشد.

۴-۱. شناسایی زیر دامنه‌ها

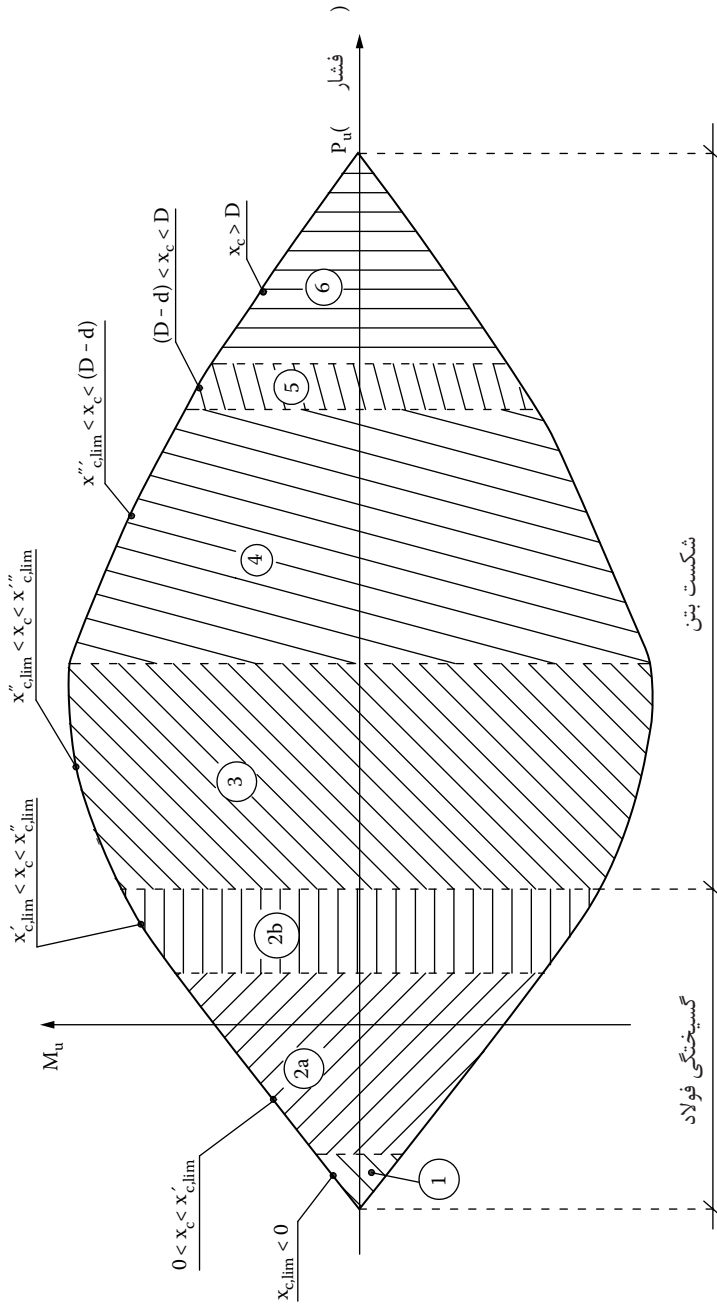
۴-۱-۱. زیر دامنه‌های ۱ و ۲: خرابی ناشی از تسلیم آرماتورها

در زیر دامنه ۱ (شکل‌های ۴-۱ تا ۷-۱) موقعیت تار خنثی از مبدأ که در بالای مقطع مستطیلی شکل قرار داده شده اندازه‌گیری می‌گردد و در محدوده $[[= \infty, 0]]$ تغییر می‌کند. کرنش در آرماتورهای کششی به حد نهایی می‌رسد و تنش متناظر آن به تنش نهایی طراحی خواهد رسید که در این حالت کرنش در آرماتور فشاری توسط معادله (۷-۱) ارائه می‌شود:

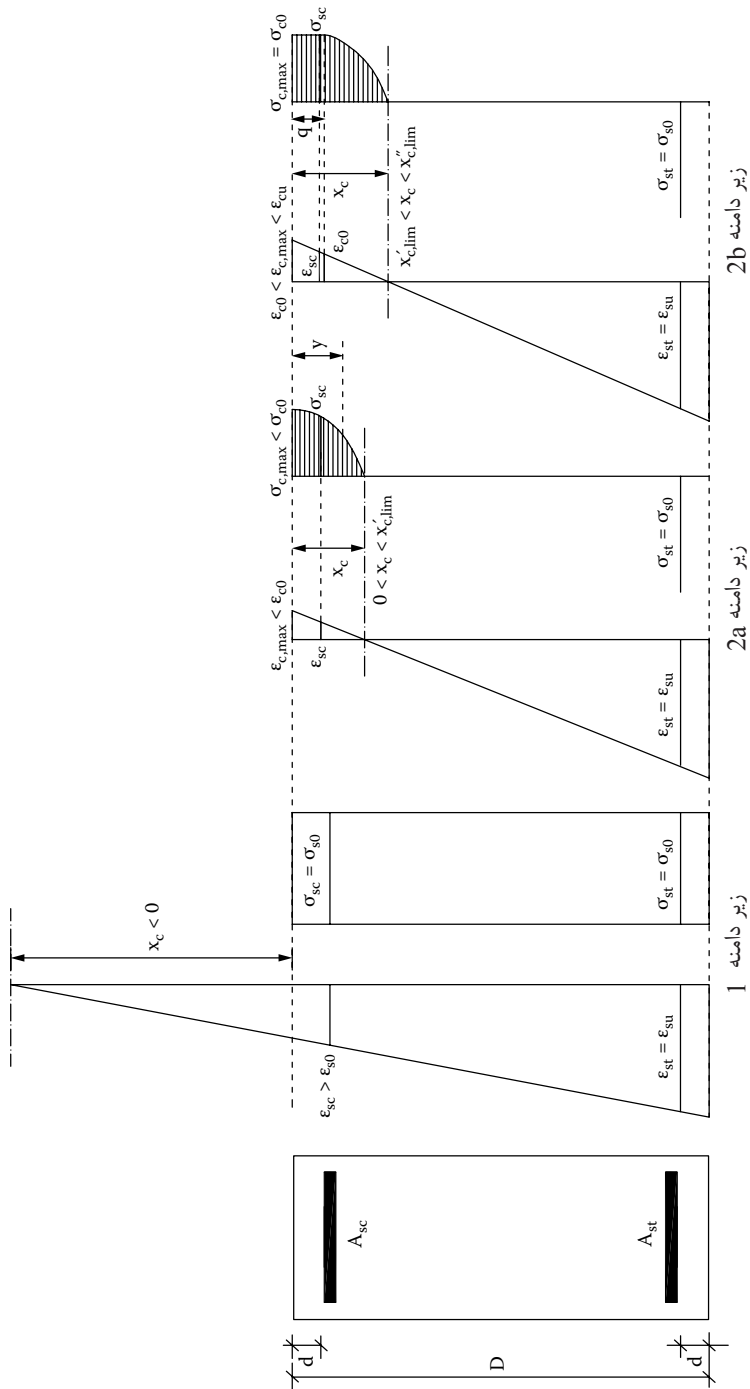
$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{su} \left(\frac{x_c - d}{D - x_c - d} \right) \quad \forall x_c < 0 \quad (7-1)$$

کرنش در آرماتور فشاری به حد الاستیک خواهد رسید در صورتی که تار خنثی در موقعیت زیر قرار گیرد:

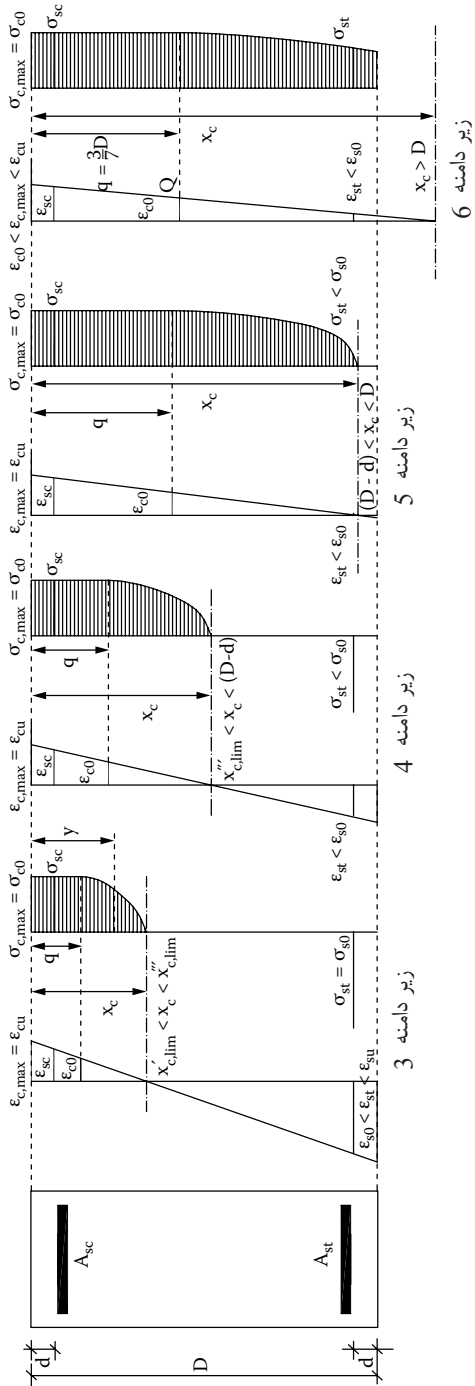
$$x_{c,lim}^0 = \frac{d(\varepsilon_{su} + \varepsilon_{s0}) - D\varepsilon_{s0}}{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_{s0})} \quad (8-1)$$



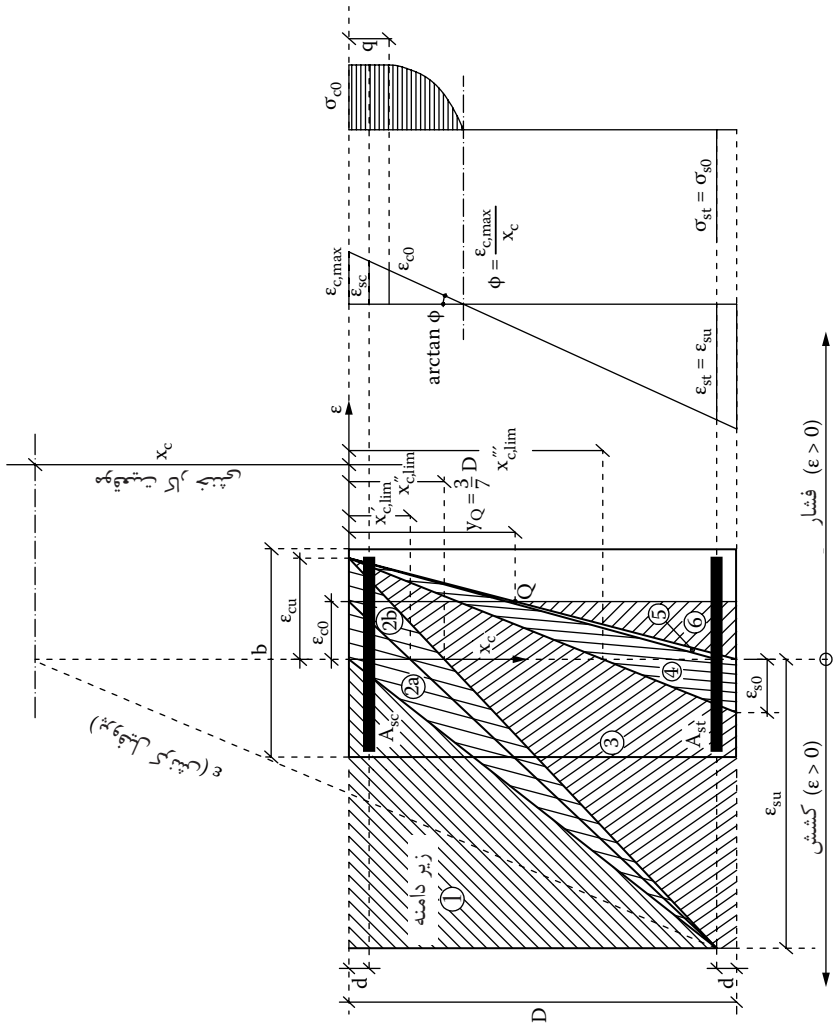
شکل ۱-۴. منحنی اندرکنش P-M برای زیر دامنه‌های مختلف



شکل ۱-۵. خرابی ناشی از تسلیم آرماتور کششی



شکل ۱-۶. خرابی ناشی از خرد شدن بتن



شکل ۱-۷. پروفیل کرنش برای زیر دامنه‌های مختلف

برای $\varepsilon_{sc} > \varepsilon_{s0}$ ، $\sigma_{sc} = \sigma_{s0}$ ، و نیروی محوری و لنگر خمشی نهایی برابر خواهد بود با:

$$\begin{cases} P_u = \sigma_{s0}(A_{sc} - A_{st}) \\ M_u = \sigma_{s0}(A_{st} + A_{sc})\left(\frac{D}{2} - d\right) \end{cases} \quad \forall x_c \in [-\infty, x_{c,lim}^0] \quad (9-1)$$

برای $\varepsilon_{sc} \leq \varepsilon_{s0}$ ، $\sigma_{sc} = E_s \varepsilon_{sc}$ و نیروی محوری و لنگر خمشی نهایی (با توجه به مرکز ثقل [CG] سطح مقطع) برابر خواهد بود با:

$$\begin{cases} P_u = A_{sc} E_s \varepsilon_{su} \left(\frac{x_c - d}{D - x_c - d} \right) - \sigma_{s0} A_{st} \\ M_u = \left[A_{sc} E_s \varepsilon_{su} \left(\frac{x_c - d}{D - x_c - d} \right) + \sigma_{s0} A_{st} \right] \left(\frac{D}{2} - d \right) \end{cases} \quad \forall x_c \in [x_{c,lim}^0, 0] \quad (10-1)$$

از معادلات بالا، موقعیت تار خنثی را می‌توان استدلال نمود:

$$x_c = D - d - \frac{A_{sc} E_s \varepsilon_{su} (D - 2d)}{P_u + A_{sc} E_s \varepsilon_{su} + A_{st} \sigma_{s0}} \quad (11-1)$$

با جایگذاری در رابطه (۱۱-۱) خواهیم داشت:

$$M_u = \left(\frac{D}{2} - d \right) (P_u + 2A_{st} \sigma_{s0}) \quad (12-1)$$

چنانچه عمق تار خنثی صفر گردد، نیروی محوری و لنگر خمشی نهایی برابر خواهد بود با:

$$\begin{cases} P_u = -A_{sc} E_s \varepsilon_{su} \left(\frac{d}{D - d} \right) - \sigma_{s0} A_{st} \\ M_u = \left[\sigma_{s0} A_{st} - A_{sc} E_s \varepsilon_{su} \left(\frac{d}{D - d} \right) \right] \left(\frac{D}{2} - d \right) \end{cases} \quad \text{for } x_c = 0 \quad (13-1)$$

زیر دامنه ۲ خود از ۲ منطقه تشکیل شده است که بدین صورت تعریف می‌شوند: تسلیم آرماتور کششی چنانچه کرنش بتن در محدوده الاستیک باقی می‌ماند (۲a) و تسلیم آرماتور کششی وقتی که کرنش بتن به حد نهایی برسد (۲b). عمق محور خنثی در این مناطق در محدوده