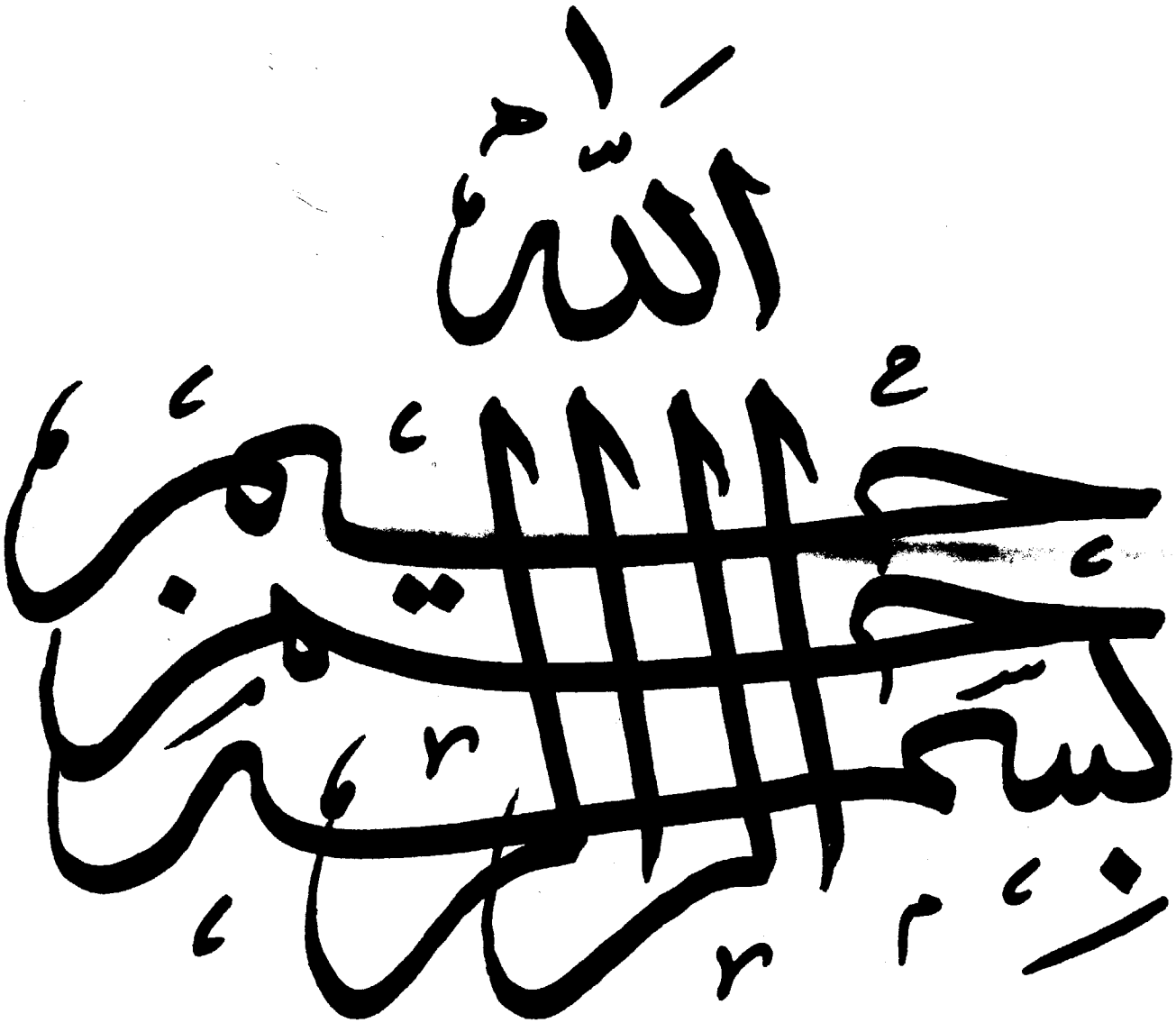


٢٨٩.٢

دانشگاه تهران
دانشکده فنی

۱۳۸۰ /۹/ ۲۰

پایان‌نامه براي دريافت درجه کارشناسي ارشد

در

رشته مهندسي عمران
گرايش ســـازه

موضوع :

تحليـــل ترک خوردگی پيشرونده ونفوذ پرتابه ها در سازه های بتن مسلح به روش المانهای مجزا

استاد راهنما:

دکتر سهيل محمـــــــدي

نگارش:

محمـــد رضـــا آرم

تابستان ۸۰

015237

۳۸۶۰۲

تقدیم به

روح ملکوتی حضرت امام خمینی (ره) سلسله جنبان انقلاب اسلامی ایران

تقدیم به

همه شهیدان ، جانبازان و آزادگان که در راه اسلام برای استقلال و آزادی میهن جانبازی کردند و آسایش امروز ما مرهون ایثار آنهاست.

و تقدیم به

پدر و مادر مهربان و همسر عزیزم که همراه و یار من در طول دوران تحصیل بودند.

<< من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق >>

اکنون که با یاری خدا این پایان نامه به پایان رسیده است لازم میدانم از زحمات استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمدی که مرا از کمکها و راهنمایی های فراوان خویش بهره مند نمودند و به دفعات وقت خود را در اختیار اینجانب قرار دادند **کمال تشکر و قدردانی را بجا آورم. پاداش ایشان این فرمایش امام صادق (ع) که** فرمودند: « کسی که دانش آموزد و آن را بکار بندد و برای خدا به دیگران بیاموزد در ملکوت آسمانها بزرگ خوانده میشود و گفته می شود: که برای خدا آموخت و برای خدا بکار بست و برای خدا به دیگران آموخت.»

همچنین از زحمات مسئولین مرکز کامپیوتر گروه مهندسی عمران و کتابخانه دانشکده فنی که در حین انجام این پایان نامه مرا یاری کردند تشکر مینمایم و آرزوی سلامت آنها و توفیق خدمت بیشتر به علم و دانش را از خداوند خواستارم . به امید فردای بهتر برای علم و دانش.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ۳

فصل اول : مبانی مدلسازی سازه های بتن مسلح

۱-۱) کلیات..... ٦

۱-۲) مدل رفتاری بتن ٦

۱-۳) مدل رفتاری فولاد ۸

۱-٤) مدل چسبندگی بین بتن و فولاد..... ۱۰

فصل دوم : پلاستیسیته بتن

۲-۱) مقدمه ۱۱

۲-۲) مدل های رفتاری الاستیک خطی- شکست ترد..... ۱۸

۲-۳) مدلهای شکست الاستیک غیرخطی بتن..... ۲۷

۲-٤) رفتار بعد از گسیختگی..... ۳٤

۲-٥) معیار انهدام بتن..... ۳٥

۲-٦) مدلهای شکست الاستوپلاستیک کامل..... ٥۷

۲-۷) مدلهای شکست الاستوپلاستیک سخت شونده ٦٥

۲-۸) مدل پلاستیسیته بتن..... ۷۱

۲-۸-۱) رفتار سخت شدگی..... ۷۱

۲-۸-۲) رفتار نرم شدگی ۷٦

۲-۹) ترک و مکانیک شکست ۷۸

فصل سوم: روش اجراء محدود

۳-۱) مسائل غیر خطی یک بعدی ۸۸

۳-۲) تئوری پایه اجزاء می رود برای مدلهای الاستوپلاستیک دو بعدی..... ۹۲

۳-۳) تحلیل دینامیکی صریح..... ۱۰۱

فصل چهارم: روش المانهای مجزا

٤-۱) مقدمه ۱۰٤

٤-۲) ردیابی تماس ۱۰٦

٤-۳) اندرکنش تماس ۱۰۷

٤-٤) الگوریتم شکست..... ۱۱۲

فصل پنجم: مدلسازی کاربردهای عملی

٥-۱) کلیات..... ۱۱٥

٥-۲) مدل شماره ۱ ..... ۱۱٦

٥-۳) مدل شماره ۲ ..... ۱۱۸

٥-٤) مدل شماره ۳..... ۱۲۰

٥-٥) مدل شماره ٤ ..... ۱۲۲

٥-٦) مدل شماره ٥ ..... ۱۲۳

نتیجه گیری و جمع بندی..... ۱۲٤

مراجع..... ۱۲٦

چکیده:

در سالهای اخیر با توجه به وجود کامپیوترهای پیشرفته و توسعه روشهای عددی تمایل قابل توجه ای به آنالیز عددی سازه های بتن مسلح در برابر بارهای ضربه ای بوجود آمده است. در این پایان نامه براساس روش ترکیبی *المانهای محدود و مجزا* (Finite / Discrete Element Method) **یک مدل تحلیلی از سازه بتن مسلح ارائه می گردد که امکان مدلسازی برخورد پرتابه ها ایجاد و** رشد ترکهای پیشرونده، نفوذ پرتابه ها و کلیه رفتارهای تماسی پس از ترک خوردگی را با در نظر گرفتن رفتار نرم شدگی بتن فراهم می سازد.

بدین منظور ضمن بررسی مدلهای رفتاری بتن مسلح مدلهای متنوع تسلیم و شکست در **زمینه رفتار غیرخطی فشاری، سخت شدگی، خرد شدگی، ترک خوردگی و نرم شدگی بتن و رفتار غیرخطی فولاد که تا کنون ارائه شده اند مورد ارزیابی قرار می گیرد.**

در مرحله بعد اصول روش اجزاء محدود در پلاستیسیته یک بعدی و دوبعدی بیان می شود و پس از آن مبانی روش المانهای مجزا ارائه می گردد. روش المانهای مجزا کل محیط را به صورت مجموعه ای از المانهای مجزا فرض می کند. که المان ها در ضمن عملکرد شکل پذیر خود بوسیله یک نوع اندرکنش تماسی با سایر المانها (که در مکانیک تماس تعریف می شود) همانند محیط اصلی رفتار می کنند.

در انتها تحلیل چند سازه بتنی و بتن مسلح انجام می شود و جهت کنترل با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می گیرد.

Abstract:

In recent years, there has been considerable interest in numerical analysis of reinforced concrete structures by powerful computers.

In this research, an analytical model of reinforced concrete structure based on a *combined finite discrete element method* has been proposed . Using this approach, it is possible to model the impact loading generated from projectiles, progressive cracking, strain softening of concrete, penetration of projectiles and contact features of postcracking. For this purpose, various constitutive laws , yield and fracture models, hardening , crashing , cracking , softening and nonlinear behaviour of steel bars have been studied .

In the next stage , the principles of finite element in plasticity (one and two dimentional) and discrete element method are discribed. The discrete element method idealizes the whole medium into an assemblage of individual bodies, which in addition to their own defomable response, interact with each other (through a contact type interaction) to perform the same response as the medium.

Finally several concrete and reinforced concrete structures have been simulated and compared with experimental results.

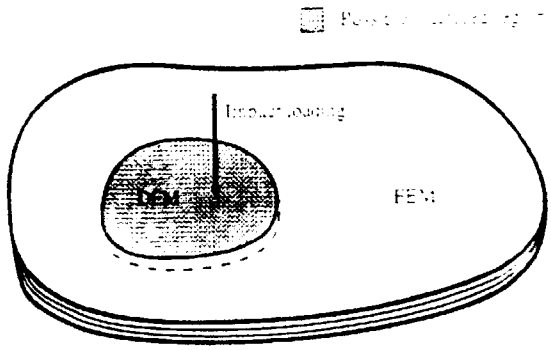
مقدمه:

محاسبه ترک خوردگی پیشرونده در سازه هـای بتنـی و بتـن مسـلح نظـیر سـدها، پلـها، پناهگاهها، سازه های مدفون و .... در اثر بارگذارهای خارجی اعـم از اسـتاتیکی و دینـامیکی از **اهمیت به سزایی برخوردار است. به علت وجود مکانیسمها و عوامل متعددی که در رفتار این سازه ها مؤثر می باشند، برآورد دقیق چنین رفتاری به سادگی امکان پذیر نمی باشد. در این میان توسـعه** یک مدل عددی مناسب که امکان مدلسازی برخورد پرتابه به سازه مقاوم را فراهـم کـرده و ضمـن پیش بینی بروز و گسترش پیشرونده ترکها درسازه وضعیت نفوذ پرتابه را نـیز مـورد بررسـی قـرار دهد بیش از پیش مشکل می باشد.

امروزه با توجـه بـه توسـعه و پیشـرفت روشـهای عـددی و کـامپیوتری و بـا اسـتفاده از **کامپیوترهای پرقدرت می توان بجای استفاده از روابط تجربی نفوذ پرتابه با دستیابی بـه تحلیلـهای دقیق روشی مطمئن و ابزاری کارآمد را در اختیار مهندسین محاسب قرار داد تا با اطمینان هـر چـه** بیشتر در خصوص طرح نهایی اقدام نمایند.

در این رساله یک مدل تحلیلی دوبعدی از سازه های بتن مسلح ارائه می شود کـه ضمـن در برداشتن رفتار پلاستیک بتن و فولاد امکان مدلسازی برخورد پرتابه ها ایجـاد و رشـد ترکـهای پیشرونده و کلیه رفتارهای تماسی پس از ترک خوردگی را فراهم می سازد. جهت دستیابی به ایـن مهم روش مرکب *المانهای محدود و مجزا* (Combined Finite / Discrete Element) استفاده می شود.

روش المانهای محدود (FEM) برای مدلسازی مسائل تکثیر و انتشار ترک خوردگی گسترده مناسب نمی باشد زیرا ایـن روش بـر تئـوری مکـانیک محیطـهای پیوسـته اسـتوار اسـت و در آن گسستگی در المان قابل تعریف نمی باشد.



نمایشی از روش مرکب المانهای محدود و مجزا

از طرفی تئوری مکانیک شکست و الاستیسیته فقط برای پیگیری گسترش یک ترک منفرد یا یک ناحیه با ترک خوردگی کم که پارگی در آن رخ نمی دهد مناسب می باشد. اما در روش المانهای مجزا بوسیلهٔ ترکیب پلاستیسیته و مکانیک شکست با مفاهیم مکانیک تماس روش جدیدی ابداع میشود که با مکانیک شکست کلاسیک متفاوت است. براساس این روش ترک خوردگی بتن با در نظر گرفتن رفتار نرم شدگی کرنش پس از ترک خوردگی مدلسازی می شود و باز شدن ترکها و تغییر مش بندی سازه همراه با گسترش ترکها در هر گام زمانی انجام می پذیرد.

در روش المانهای مجز (DEM) قسمت ترک خورده به صورت مجموعه ای از المانهای منفرد که به وسیله روابط مکانیک تماس به یکدیگر مرتبط شده اند مدلسازی می شود.

در فصل اول این پایان نامه تاریخچه و مبانی مدلسازی رفتار سازه های بتن مسلح بیان می شود و خاطر نشان می گردد که چگونه این مدلها توسعه یافته و امروزه تحلیلهای پیچیده بوسیله کامپیوترهای قدرتمند قابل انجام می باشد. در فصل دوم به طور مبسوط تئوری پلاستیسیته بتن ارائه می گردد و رفتار بتن قبل و پس از ترک خوردگی مورد بررسی قرار می گیرد. در انتهای این فصل مبانی مکانیک شکست بتن نیز مرور می شود. در فصل سوم اصول روش اجزاء محدود یک بعدی و دوبعدی در پلاستیسیته در حالت استاتیکی و دینامیکی بیان می شود. در حالت دینامیکی

روش آنالیز *Explicit* که مورد استفاده در این پایان نامه است شرح داده می شود. در فصل چهارم مبانی روش اجزای مجزا (Discrete Element Method) و مکانیک تماس ارائه می شود. در فصل پنجم مدلسازی و تحلیل کاربردهای عملی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی صورت می گیرد. و نهایتاً جمع بندی و نتیجه گیری ارائه می گردد.

فصل اول

مبانی مدلسازی سازه های بتن مسلح

۱-۱) کلیات

روشهای آنالیز غیر خطی و طراحی سازه های بتن مسلح با استفاده از روش اجزاء محدود نیازمند شکل گیری یک تحلیل غیر الاستیک نیرو تغییر مکان و مشخص شدن پارامترهای تسلیم و شکست بتن می باشد. امروزه برخی از رفتارهای پیچیده بتن مسلح مانند خصوصیات تنش کرنش غیرخطی چند محوره، ترک خوردگی، فقط شدگی دانه های شن و ماسه درهم و تنشهای چسبندگی بین بتن و فولاد قابل مدلسازی هستند.

کاربرد اجزاء محدود در تحلیل سازه های بتن مسلح اولین بار در سال ۱۹٦۷ توسط Ngo و Scordelis انجام شد. این اولین مدل شامل یک شبیه سازی چسبندگی و ترک خوردگی بود که به وسیله آن تنشها در مجاورت ترک قابل محاسبه بود. از آن پس مطالعات گسترده ای در این راستا انجام شد و در این مسیر مهمترین فاکتور محدود کننده در آنالیز تعیین مدل رفتاری بتن مسلح بود. لذا بیشترین تلاشهای انجام شده در سالهای گذشته بروی بهینه کردن رابطه بنیادی رفتار بتن مسلح بوده است تا بتوان اندر کنش بین فولاد و بتن را به بهترین شکل مدلسازی کرد. امروزه با استفاده از کامپیوترهای پرقدرت تحلیل و طراحی سازه های بتنی با فرض مدلهای رفتاری الاستیک و پلاستیک غیرخطی و چند محوره و تئوری جریان افزایشی پلاستیسیته برای بتن قابل انجام می باشد.

۱-۲) مدل رفتاری بتن :

تلاشهای قابل ملاحظه ای در سالهای اخیر بروی مدلهای عددی جهت شبیه سازی رفتار مصالح شبه ترد مانند ملات، بتن، سنگ یا آجر انجام شده است. مدلهای عددی براساس روش اجزاء محدود به دو گروه عمده ترک پیوسته (Smeared Crack) و ترک مجزا (Discrete Crack)

تقسیم بندی می شوند. در نوع ترک پیوسته ترکها معمولاً در یک مش المان محدود ثابت و پیوسته مدلسازی می شوند و انتشار ترک معمولاً با کاهش در سختی و مقاومت مصالح معادل سازی می شود. روابط تنش کرنش غیرخطی هستند و یک نرم شدگی کرنش (Strain Softening) را نشان می دهند. این روش اولین بار در سال ۱۹٦۸ توسط Rashid انجام شد. در نظرگرفتن نرم شدگی کرنش بتن مقداری مشکلات در تحلیل ایجاد میکند که بوسیله تکمیل کردن مدل با چند شرط ریاضی قابل حل شدن است. (1988-Bazant – Cabot)

نوع ترک مجزا که یک ترک یا یک مجموعه ای از ترکها در سازه بوجود می آید ترجیح دارد. مدل ترک چسبنده بوسینه هیلربرگ و همکاران در سال ۱۹۷٦ ارائه شد که مود I شکست بتن را در نظر می گیرد. این روش در سال ۱۹۹٤ توسط Cervenka برای شکست براساس مودهای مرکب I و II تکمیل گردید. در سال ۱۹۹۵ روش Cervenka توسط Saleh و Aliabadi در المانهای مرزی استفاده شد. در این روش خصوصیات کاملی از مصالح نظیر انرژی شکست و تابع نرم شدگی در مد II مورد نیاز است.

برای یک مصالح شبه ترد تحت یک بارگذاری کلی مرکب از مودهای مختلف . در هنگام شروع ترک خوردگی مودهای مختلف اهمیت دارند اما وقتی ترک در یک حالت پایدار در حال رشد می باشد مود I موضعی غالب است. با این فرض فرمولاسیون مدلهای شکست بر اساس مودهای مرکب با تعداد پارامترهای کمتری انجام می شود.

مدل رفتاری بتن شامل تعریف رابطه تنش کرنش، معیار شکست، قانون جریان، سطح بارگذاری، سخت شدگی و نرم شدگی کرنش می باشد. امروزه مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده است که امکان آنالیز غیرخطی این ماده ساختمانی را ممکن می سازد. Figueriras و Owen در سال ۱۹۸۸ یک مدل رفتاری بتن با کلیه پارامترهای پلاستیسیته کامل و سخت شدگی کرنش در فشار شامل سطح تسلیم و مفروض داشتن فولاد به صورت یک لایه گسترده را ارائه داده اند. Bathe و Ramaswamy مدلی ارائه داده اند که علاوه بر موارد فوق کرنش نرم شدگی را نیز در نظر می گیرد (۱۹۷۰). در روش آنها فولاد مسلح کننده به صورت المانهای خرپایی (Cable)

فرض می شود. Onate نیز با تعریف تابع چسبندگی مکانیزم تخریب فشاری و کششی بتن را بیان می کند. (۱۹۸۸)

برای کلیه مدلهای رفتاری مورد اشاره تعدادی پارامتر مورد نیاز است که توسط آزمایشات استاندارد تعیین می شوند. در فصلهای آینده به تشریح مدلهای رفتاری مشهور بتن و چگونگی مدلسازی ترک خوردگی در بتن می پردازیم.

۱-۳) مدل رفتاری فولاد:

در سازه های بتن مسلح ضعف بتن در کشش بوسیله فولاد گذاری جبران می شود. فولاد تا حد زیادی از گسترش ترک در سازه بتنی جلوگیری می نماید. به علت آنکه ضخامت فولاد در سازه بتن مسلح معمولاً کم است و می توان فرض کرد تنها توانایی انتقال نیروی محوری را دارد، فرض یک رابطه تنش کرنش تک محوری برای فولاد کافی است و مدلسازی رفتار فولاد چندان پیچیده نمی باشد. رفتار فولاد پس از حد تسلیم به دو صورت قابل مدلسازی است. یکی اینکه فولاد پس از حد تسلیم به صورت یک ماده پلاستیک کامل تغییر شکل نا محدود داشته باشد و دیگر اینکه تغییر شکل آن به ε_u محدود شود و پس از کرنش نهایی ترک خورده گسیخته شود

۱-۳-۱) رابطه تنش کرنش فولاد:

۱-۳-۱-۱) مشخصه های عمومی فولاد مسلح کننده:

روابط تنش کرنش فولاد بسیار شناخته شده تر از روابط نظیر در بتن است که مشخصات کلی آن به قرار زیر است:

۱) یک منطقه الاستیک خطی اولیه تا نقطه $(\sigma_y, \varepsilon_y)$ وجود دارد. شیب این خط مدول الاستیسیته متوسط است که با یک ضریب تغییرات ۳۳ درصد برای کلیه فولادها وجود دارد.

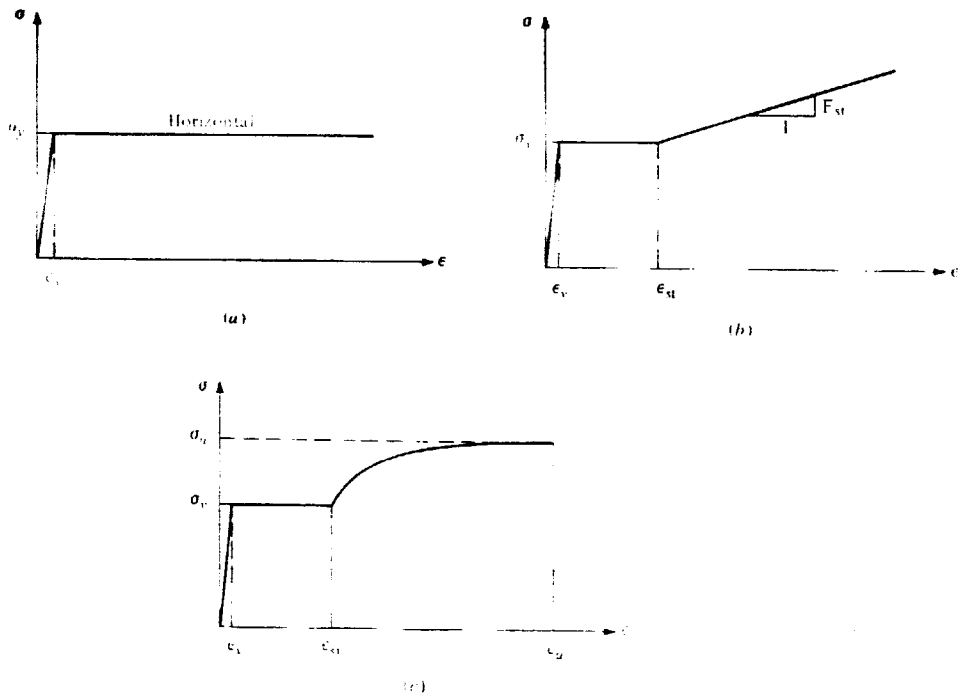
۲) یک منطقه تسلیم از ε_y تا کرنش سخت شدگی ε_{sh} دارد.

۳) یک منطقه سخت شدگی از ε_{sh} تا کرنش نهایی ε_u وجود دارد. مقاومت نهایی تقریباً ۱/۵۵ برابر مقاومت تسلیم است. با افزایش مقاومت میلگرد، شکل پذیری فولاد کاهش می یابد.

منحنی تنش کرنش برای فولاد در کشش و فشار معمولاً یکسان در نظر گرفته می شود.

۱-۳-۱-۲) مدلهای تنش کرنش برای فولاد:

از آنجا که بیشترین قابلیت فولاد انتقال نیروی محوری می باشد و عموماً المانهای فولادی یک بعدی هستند معمولاً احتیاجی به ایجاد روابط بنیادی چند محوره پیچیده برای فولاد نمی باشد. بسته به دقت محاسبات یکی از سه منحنی تنش کرنش تک محوری زیر برای فولاد بکار می رود و برای هر یک لازم است تا به طور تجربی مقادیر تنشها و کرنشها در حد تسلیم، سخت شدگی کرنش و مقاومت کششی نهایی بدست آید.



شکل(۱-۱) منحنی های تنش کرنش فولاد

از نتایج آزمایشات مقادیر مناسب ε_y ε_u برای فولاد ساختمانی به ترتیب 0.002 و 0.2 می باشند.