# بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه

# بررسی مقاومت برشی تیرهای پیش تنیده دارای بتن خودمتراکم با آنالیز اجزاء محدود

استاد راهنما :

دکتر علی اکبر مقصودی

مؤلف :

نوراله حیدری

بهمن ماه ۱۳۸۸

دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

**گروه مهندسی عمران**

**دانشکده فنی و مهندسی**

**دانشگاه شهید باهنر کرمان**

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو: نوراله حیدری

استاد راهنما : دکتر علی اکبر مقصودی

داور۱: دکتر سعید شجاعی

داور۲: دکتر حسین ابراهیمی

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده در جلسه دفاع : دکتر محسن صانعی

معاونت پژوهشی و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر غلامرضا پور ابراهیم

**حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.**

**تقدیم به:**

تمامی عزیزانی که دوستشان دارم،

و

برگ سبزی به

برترین استادان زندگیم؛

آنان که مرا صادقانه زیستن آموختند،

صبورانه بودن را فدایم کردند،

سوختند تا بسازم،

ساختند تا برافرازم و به پرواز درآیم،

و تمام هستیشان را به هستیم هدیه کردند.

## تقدیر و تشکر

شکر ذات مقدس پروردگار را سزاست که شاکرترین بندگانش از حق شکر او عاجز و عابدترین آنان در عبادتش قاصر، شکر را تعلیم داده و بر آن ثواب عظیم مقرر فرمود. اقیانوس رحمتش را ساحلی و نعمتهایش را شماره‌ای نباشد. او که در هنگام رحمت، ارحم الراحمین و در غوغای عقوبت، اشد المعاقبین است.

حال که به لطف پروردگار این کار به انجام رسیده، بایسته می‌دانم از عزیزانی که مرا در این راه یاری نموده‌اند سپاسگزاری نمایم. از آقای دکتر علی اکبر مقصودی که با فرزانگی و روحیه خستگی ناپذیر و رهنمودهای خود، محور حمایت اینجانب در این مسیر بوده‌اند، برای عمری سپاسگزارم. صمیمانه‌ترین سپاس‌ها را به حضور تمامی کسانی که همواره از هیـچ کوششی در کمک به اینجـانب دریغ ننمودند، تقدیم می‌دارم.

**نوراله حیدری**

**چکیده:**

بتن خود متراکم یا بتن نسل جدید (Self Compacting Concrete)، بتنی است که استفاده از آن با روند چشمگیری رو به افزایش می باشد. این نوع بتن بدون نیاز به هیچگونه ویبره داخلی یا خارجی قادر به اجرا در هر نوع سازه بتنی می باشد.

در این تحقیق بررسی رفتار برشی تیرهای پیش تنیده ساخته شده با بتن خود متراکم با استفاده از آنالیز عددی انجام گرفته است. روش های عددی یکی از روش های مقرون به صرفه در آنالیز سازه ها می باشد. هر چند تحقیقات آزمایشگاهی اعضا دارای اهمیت و اطمینان به عملکرد آن ها بیشتر می باشد.

در پایان نامه حاضر آنالیز اجزاء محدود به صورت غیر خطی با استفاده از دو نرم افزار Response-2000 و ANSYS 11 انجام گرفته است. در نهایت نتایج حاصل از آنالیز عددی با داده های آزمایشگاهی و مقادیر آئین نامه ای مقایسه گردیده است. بررسی ها نشان می دهد امکان استفاده از نرم افزار ANSYS11 و Response-2000، در برش تیر های پیش تنیده دارای بتن خودمتراکم وجود دارد ضمن اینکه سازگاری مناسبی در آنالیزهای عددی برشی سازه ها بین داده های آزمایشگاهی و آنالیز اجزاء محدود برقرار می باشد.

**کلید واژه ها** : مقاومت برشی، بتن خودمتراکم، تیرهای پیش تنیده، آنالیز اجزامحدود

# فهرست مطالب

عنوان | شماره صفحه


فهرست اشکال ..... ۸

فهرست جداول..... ۱۱

مقدمه ..... ۱۲

۱-۱) اهمیت استفاده از بتن خود متراکم(Self Cosolidating Concrete) ..... ۱۳

۱-۲) مقاومت برشی اعضای بتنی ..... ۱۳

۱-۳) انگیزه تحقیق ..... ۱۳

۱-۴) اهداف و حدود پروژه ..... ۱٤

فصل دوم: معرفی بتن خود متراکم و سازه های پیش تنیده ..... ۱۵

۲-۱) بتن خود متراکم..... ۱٦

۲-۱-۱) معرفی بتن خود متراکم ..... ۱٦

۲-۱-۲) مصالح و طرح اختلاط ..... ۱۷

۲-۱-۳) تاریخچه و موقعیت کنونی ..... ۱۸

۲-۲) بتن پیش تنیده ..... ۱۹

۲-۲-۱) تاریخچه ..... ۱۹

۲-۲-۲) روش های پیش تنیدگی ..... ۲۰
۲-۲-۲-۱) بتن پیش کشیده ..... ۲۰
۲-۲-۲-۲) بتن پس کشیده ..... ۲۱
۲-۲-۳) مصالح ..... ۲۳
فصل سوم: مقاومت برشی ..... ۲۵
۳-۱) ترک خوردگی برشی ..... ۲۶
۳-۱-۲) انواع ترک های برشی ..... ۲۷
۳-۲) مروری بر آئین نامه های موجود برای محاسبه برش ..... ۲۸
۳-۲-۱) ضوابط آئین نامه AASHTO Standard ..... ۲۸
۳-۲-۲) نظریه اصلاح شده میدان فشاری (MCFT) ..... ۳۰
۳-۲-۲-۱) معادلات سازگاری در روش MCFT ..... ۳۱
۳-۲-۲-۲) معادلات تعادل ..... ۳۲
۳-۲-۲-۳) روابط انتقال تنش در بتن ترک خورده ..... ۳۲
۳-۲-۳) آئین نامه AASHTO LRED ..... ۳۶
۳-۲-۵) مقاومت برشی مطابق با آئین نامه بتن ایران (آبا) ..... ۴۰
فصل چهارم: مطالعات آزمایشگاهی ..... ۴۲
۴-۱) معرفی مطالعات آزمایشگاهی ..... ۴۳

۴-۲) مشخصات مصالح ..... ٤٣
۴-۲-۱) سنگدانه ..... ٤٣
۴-۲-۲) سیمان، میکروسیلیس و فیلر ..... ٤٣
۴-۲-۳) فوق روان کننده ..... ٤٥
۴-۳) طرح اختلاط ..... ٤٥
۴-۴) نتایج آزمایش مقاومت فشاری جهت رسم نمودار تنش-کرنش ..... ٤٦
۴-۵) کابل های پیش تنیده ..... ٤٦
۴-۶) فولادهای معمولی ..... ٤٧
۴-۷) طراحی و بارگذاری تیر T شکل پیش تنیده ..... ٤٨
فصل پنجم: تحلیل نرم افزار المان محدود ANSYS ..... ٥١
۵-۱) نرم افزار ANSYS ..... ٥٢
۵-۲) کاربری نرم افزار المان محدود ..... ٥٢
۵-۳) دستگاههای مختصات در نرم افزار ANSYS ..... ٥٣
۵-۳-۱) انواع دستگاههای مختصات ..... ٥٣
۵-۴) بارگذاری در نرم افزار ANSYS ..... ٥٤
۵-۴-۱) گام های بار و معادلات تکراری ..... ٥٤
۵-۵) بررسی انواع مسائل غیرخطی در نرم افزار ANSYS ..... ٥٥

۵-۵-۱) بررسی رفتار غیرخطی سازهای ناشی از خصوصیات غیرخطی مصالح .....۵۵

۵-۵-۲) بررسی رفتار غیرخطی سازهای ناشی از خصوصیات غیرخطی هندسی.....۵۷

۵-۵-۳) بررسی رفتار غیرخطی سازهای ناشی از خصوصیت تغییر وضعیت .....۵۷

۵-۶) روش حل معادلات غیرخطی در نرم افزار ANSYS .....۵۸

۵-۷) روش های حل در برنامه ANSYS .....۶۰

۵-۸) معیار همگرایی .....۶۰

فصل ششم: مدل سازی در نرم افزار ANSYS.....۶۲

مراحل مدلسازی در نرم افزار ANSYS .....۶۳

۶-۱) انتخاب سیستم آحاد مناسب .....۶۳

۶-۲) انتخاب نوع المان .....۶۴

۶-۲-۱) المان Solid65.....۶۴

۶-۲-۲) المان Link8 .....۶۶

۶-۲-۲-۱) مدلسازی میلگرد در مدل بتن مسلح.....۶۶

۶-۳) تعیین ثوابت حقیقی.....۶۸

۶-۴) تعریف خصوصیات و رفتار مکانیکی مواد.....۶۸

۶-۴-۱) خواص مصالح .....۶۸

۶-۴-۱-۱) بتن .....۶۸

۶-۴-۲) داده های ورودی مدل اجزاء محدود ..... ٦٩

۶-۴-۲-۱) ایزوتروپیک- خطی ..... ۷۰

الف) مدول الاستیسته (EX) ..... ۷۰

ب)ضریب پواسون ( PRXY ) ..... ۷۰

۶-۴-۲-۲) ایزوتروپیک-چندخطی ..... ۷۰

۶-۴-۳) رفتار مصالح ..... ۷۱

۶-۴-۳-۱) ضریب انتقال برش ( ثابت های ۱و۲) ..... ۷۲

۶-۴-۳-۲) مقاومت کششی ترک خوردگی ( ثابت ۳) ..... ۷۳

۶-۴-۳-۲) مقاومت فشاری خرد شدگی ( ثابت ۴) ..... ۷۳

۶-۴-۴) آرماتورهای فولادی و رشته های پیش تنیده ..... ۷۳

۶-۵) مش بندی احجام موجود ..... ۷٤

۶-۶) بار گذاری و اعمال شرایط تکیه گاهی ..... ۷۵

۶-۶-۱) مدل سازی شرایط تکیه گاهی ..... ۷۵

فصل هفتم: مدل سازی با نرم افزار Response-2000 ..... ۷۷

۷-۱) معرفی اجمالی مقطع ..... ۷۸

۷-۲) معرفی اطلاعات کلی به برنامه ..... ۸۱

۷-۳) معرفی مصالح ..... ۸۲

۷-۴) بارگذاری و تحلیل مدل.....۸٤

فصل هشتم: ارزیابی نتایج .....۸٦

۸-۱) نتایج آنالیز اجزاء محدود با نرم افزارANSYS11.....۸۷

۸-۱-۱) نتایج تحلیل ها .....۸۷

۸-۱-۲) مرحله اول: اعمال نیروی پیش تنیدگی.....۸۸

۸-۱-۳) مرحله دوم: بعد از اعمال بارگذاری تا شروع ترک خوردگی.....۸۹

۸-۱-۴) مرحله سوم: بعد از بار گذاری تا جاری شدن آرماتورهای فولادی غیر پیش تنیده..۸۹

۸-۱-۵) مرحله چهارم: بررسی رفتار تیرها در مرحله جاری شدن .....۹۰

۸-۲) مقایسه با نرم افزار Response-2000.....۹۱

۸-۳) مقایسه نتایج مدل سازی با نتایج حاصل از آئین نامه بتن ایران (آبا) .....۹۳

۸-۴) مقایسه با نتایج حاصل از آیین نامه AASHTO LRFD [۱۶].....۹۵

فصل نهم: نتیجه گیری و پیشنهادات .....۹۸

منابع:..... ۱۰۱

## فهرست اشکال

عنوان صفحه


شکل (۳-۱): ترک خوردگی برشی در یک تیر بتن مسلح ۲۷

شکل (۳-۲): انواع ترک های برشی در یک تیر ۲۸

شکل (۳-۳): خلاصه معادلات استفاده شده در (MCFT) ۳۴

شکل (۳-٤): شبکه بندی عضو بتنی با المان های غشایی کوچک ۳۴

شکل (۳-۵): قابلیت برنامه Response -2000 در تحلیل المان های پوسته ای [۱۸] ۳۵

شکل (۳-٦): روش آئین نامه AASHO LRFD در تحلیل برشی تیر [۱۷] ۳۵

شکل (۴-۱): تیر های پیش تنیده آزمایش شده در دانشگاه باهنر کرمان ۴۳

شکل (۴-۲): آزمایش مقاومت فشاری و ثبت تنش-کرنش بتن ۴۶

شکل(۴-۳) : مقایسه دیاگرام تنش-کرنش فولاد ۴۸

شکل (۴-۴): بارگذاری تیرها با استفاده از آئین نامه پل ایران و کامیون استاندارد ۴۹

شکل (۴-۵): سطح مقطع و جزئیات تیر های آزمایش شده (ابعاد بر حسب cm) ۵۰

شکل (۵-۱): مفاهیم گام بار، زیرگام و زمان $T_{۵.}$ ۵۵

شکل (۵-۲): روش نیوتن-رافسون ۵۹

شکل (۵-۳): روش تقریب طول کمان ۵۹

شکل (۶-۱): هندسه، موقعیت گرهها و دستگاه مختصات جزء Solid65 [۲۲] ۶۵

شکل (۶-۲): هندسه، موقعیت گرهها و دستگاه مختصات جزء Link8 [۲۲] ۶۶

شکل(۶-۳): روش های ایجاد میلگرد در مدل اجزاء محدود ۶۷

شکل (۶-۴): مدل رفتاری بتن در کشش و فشار [۲۲] ۶۹

شکل( ۶-۵): منحنی آزمایشگاهی تنش– کرنش بتن خودمتراکم ۷۱

شکل(۶-۶): نمودار تنش-کرنش آرماتورهای فولادی ۷۴
شکل(۶-۷): نمودار تنش-کرنش کابل های پیش تنیده ۷۴
شکل (۶-۸): مش‌بندی تیرها در ANSYS ۷۵
شکل(۶-۹): بارگذاری مدل در ANSYS ۷۸
شکل (۷-۱): اطلاعات کلی در مورد مشخصات مصالح ۷۸
شکل (۷-۲):معرفی مقطع به Response-2000 ۷۹
شکل (۷-۳): معرفی آرماتورهای غیر پیش تنیده ۸۰
شکل (۷-۴): معرفی آرماتورهای عرضی به Response-2000 ۸۰
شکل (۷-۵): معرفی اطلاعات کلی به برنامه ۸۱
شکل (۷-۶): معرفی مصالح مدلسازی ۸۲
شکل(۷-۷): معرفی مشخصات بتن ۸۳
شکل (۷-۸): معرفی مشخصات آرماتور های فولادی ۸۳
شکل (۷-۹): معرفی مشخصات کابل های پیش تنیده ۸۴
شکل (۷-۱۰): بار گذاری مدل در Response-2000 ۸۴
شکل(۸-۱): دیاگرام نیروی برشی-خیز تیر PSCC1 ۸۷
شکل(۸-۲): دیاگرام نیروی برشی-خیز تیر PSCC2 ۸۸
شکل (۸-۳): نمودار نیروی برشی- خیز تیر PSCC1 ۹۱
شکل (۸-۴): دیاگرام نیروی برشی- خیز تیر PSCC2 ۹۲
شکل (۸-۵): دیاگرام نیروی برشی- خیز تیر PSCC1 ۹۴
شکل (۸-۶): دیاگرام نیروی برشی-خیز تیر PSCC2 ۹۴

شکل (۸-۷): دیاگرام نیروی برشی- خیز تیر PSCC1 ۹۶

شکل (۸-۸): دیاگرام نیروی برشی-خیز تیر PSCC2 ۹۶

# فهرست جداول


| عنوان | صفحه |
|---|---|
| جدول (۴-۱ ) ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی سیمان و میکروسیلیس | ۴۴ |
| جدول (۴-۲): نتایج آزمایشات فاز خمیری وسخت شده بتن (HSSCC) | ۴۵ |
| جدول (۴-۳): مشخصات رشته فولاد پیش تنیده | ۴۷ |
| جدول (٤-٤): مشخصات فولاد معمولی | ٤٧ |
| جدول (۶-۱): واحدهای سیستم MKS در نرم‌افزار [۲۲] | ۶۳ |
| جدول (۶-۲): داده های مربوط به بتن در ANSYS | ۷۲ |
| جدول (۸-۱): مقایسه میزان خیز منفی حاصل از نیروی پیش تنیدگی | ۸۸ |
| جدول( ۸-۲): نیروی برشی قبل از ترک خوردگی | ۸۹ |
| جدل(۸-۳): نیروی برشی قبل از جاری شدن فولادهای معمولی | ۹۰ |
| جدول (۸-۴): نیروی برشی نهایی | ۹۰ |
| جدول (۸-۵): مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج Response-2000 در تیر PSCC1 | ۹۳ |
| جدول (۸-۶): مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج Response-2000 در تیر PSCC2 | ۹۳ |
| جدول (۸-۷): مقایسه برش نهایی با نرم افزار ANSYS ، Response-2000 و آئین نامه آبا | ۹۵ |
| جدول(۸-۸): مقایسه برش نهایی با نرم افزار ANSYS ، Response-2000 و آئین نامه AASHTO | ۹۷ |

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱) اهمیت استفاده از بتن خود متراکم(Self Cosolidating Concrete)

کارایی بالای بتن خود متراکم (بدون نیاز به ویبره) باعث گردیده است تا در ساخت سازه های بتن مسلح با تراکم آرماتور استفاده گردد. از جمله این سازه ها، تیرهای پیش تنیده با بتن خود متراکم می باشد. در اعضای پیش تنیده با توجه به فشردگی تراکم آرماتورها و ابعاد کوچک و گوشه های تنگ اعضا، استفاده از بتن های معمولی سخت و در بعضی از موارد غیرممکن می باشد. با استفاده از بتن خود متراکم به راحتی می توان بر این مشکل غلبه کرد.

## ۱-۲) مقاومت برشی اعضای بتنی

بررسی مقاومت خمشی و برشی تیرهای بتن مسلح و تیرهای پیش تنیده (دارای بتن با نیاز به ویبره) سال هاست که موضوع مطالعه محققین در سراسر دنیا می باشد. به طوری که در طراحی اعضای خمشی اختلاف ناچیزی بین نتایج آزمایشگاهی و مقادیر آئین نامه ای مشاهده می گردد، اما در طراحی برشی، اختلاف نظر قابل توجهی بین نظرات محققین و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. عوامل مختلفی در مقاومت برشی دخالت دارند علیرغم تحقیقات گسترده نظری و آزمایشگاهی که تا کنون مصروف این موضوع گشته هنوز مدل مورد اجماعی برای آن ارائه نشده است. یکی از نظریه های مورد پذیرش نسبتا گسترده در زمینه برآورد مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح (با بتن سنتی)، نظریه اصلاح شده میدان فشاری MCFT (Modified Compression Field Theory)، می باشد. بر اساس این نظریه ظرفیت ناشی از قفل و بست دو طرف ترک توسط سنگ دانه ها عامل اصلی در مقاومت برشی ناشی از بتن در تیرهای بتن مسلح می باشد.

## ۱-۳) انگیزه تحقیق

کشور ما ایران جزء مناطق لرزه خیز به شمار می رود. در مناطق لرزه خیز معمولا در ساخت سازه های بتن مسلح از مقادیر زیادی آرماتورهای فولادی استفاده می شود، که اغلب عبور بتن از بین آرماتورها و ویبره کردن آن همواره با مشکل روبرو است. از دیر باز نیاز به بتنی که بتواند به راحتی از فضای بین آرماتورها جریان یابد و تراکم مطلوبی نیز در آن ایجاد شود، احساس می شد. به نظر میرسد با استفاده از بتن نسل جدید یا خود متراکم (بتن بدون نیاز به ویبره) این مشکل

قابل حل است. بنابراین ضروری است تا در زمینه استفاده از این نوع بتن درسازه هاتحقیقات بیشتری صورت گیرد تا در آینده امکان راه یابی آن در آئین نامه ها مقدور گردد.

## ۱-۴) اهداف و حدود پروژه

هدف از انجام این پروژه بررسی رفتار برشی در تیرهای بتنی پیش تنیده ساخته شده از بتن خود متراکم با استفاده از آنالیز اجزاء محدود و برنامه Response-2000 و مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی است. بدین منظور از نتایج آزمایشگاهی دو عدد تیر T شکل پیش تنیده دارای بتن خود متراکم که در آزمایشگاه سازه دانشگاه شهید باهنر کرمان توسط استاد راهنما تحت آزمایش قرار گرفته است، استفاده شده است. به منظور مدل سازی از دو برنامه ANSYS11 و Response-2000 که برای بتن های سنتی (نیاز به ویبره) تهیه شده است استفاده گردیده و نتایج عددی بدست آمده با نتایج تیر های T شکل پیش تنیده مزبور لیکن با بتن خودمتراکم (بدون نیاز به ویبره) مقایسه گردیده است.

### ۱-۱- بخش‌های مختلف پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش رو از ۹ فصل تشکیل شده است که در هر فصل مطالب زیر آورده شده است:

فصل اول- شامل مقدمه‌ای بر کار پایان‌نامه می‌باشد.

فصل دوم- شامل معرفی بتن خود متراکم و سازه های پیش تنیده می باشد.

فصل سوم- شامل بررسی تئوری مقاومت برشی تیر ها با تکیه بر نظریه اصلاح شده میدان فشاری (MCFT) و مروری بر آئین نامه های موجود برای محاسبه برش می‌باشد.

فصل چهارم- شامل کارهای آزمایشگاهی انجام شده می‌باشد.

فصل پنجم- شامل مقدمه بر روش اجزاء محدود و نرم‌افزار ANSYS می‌باشد،

فصل ششم- شامل مدل سازی تیر ها در نرم افزار ANSYS می‌باشد.

فصل هفتم- شامل مدل سازی تیرها در نرم افزار Response-2000 می باشد.

فصل هشتم- شامل بررسی و ارزیابی کارهای انجام شده می باشد.

فصل نهم- شامل نتیجه گیری از تحقیق انجام شده و پیشنهادهایی جهت تحقیق‌های آتی در ادامه و تکمیل تحقیق حاضر می‌باشد.

# فصل دوم

## معرفی بتن خود متراکم و سازه های

## پیش تنیده