بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

بررسی رفتار خارج از صفحه دیوارهای مصالح بنایی تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش المان محدود غیر خطی

اساتید راهنما : دکتر سیّد سعید مهینی

دکتر داود مستوفی نژاد

استاد مشاور : دکتر حسینعلی رحیمی

پژوهش و نگارش : امیرحسین کریمی

مهر ۱۳۸۸

تقدیم به پدر مهربان و مادر عزیزم

هوالشکور

و من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

ذات اعلی و اقدس او را شکر می‌نمایم که اگر به بندگان خویش درس سپاس و ستایش نمی-آموخت، هرگز لب به شکر و ستایش وی نمی‌گشودیم و با چنین کفرانی گرامی‌ترین خصلت‌های انسانی را ترک می‌گفتیم.....(صحیفه سجادیه)

حضرت دوست جل و جلاله را سپاس می‌گویم که در باز کردن گره‌های مختلف اجرای پروژه حاضر مرا یاری کرد که یقین دارم بدون یاری او قادر به انجام آن نبودم.

در اینجا وظیفه خود می‌دانم از زحمات اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر داود مستوفی نژاد و دکتر سیّد سعید مهینی که با صبر و شکیبایی و راهنمایی‌های سازنده خود اینجانب را در تهیه و ارائه این پایان نامه یاری داده‌اند مراتب تشکر و قدردانی را به جای آورم، همچنین از کمک‌ها و همراهی‌های جناب آقای دکتر حسینعلی رحیمی سپاس‌گذارم.

در پایان از کلیه دوستان و دانشجویان بزرگوار که بنده را در پیشبرد این تحقیق یاری رساندند تشکر می‌نمایم.

چکیده

با توجه به بافت وسیعی از ساختمان‌های بنایی غیر مسلح و نظر به اهمیت بناهای باستانی از لحاظ تاریخی، فرهنگی و گردشگری، مقاوم سازی این بناها از مسائل مهم و قابل توجه بوده و ضروری است که ارزیابی آسیب پذیری این ساختمان‌ها با دقت کافی انجام پذیرد؛ این در حالی است که کمبود دانش در این زمینه باعث عدم ارزیابی صحیح ایمنی و همچنین ضعف در بهسازی ساختمان‌های بنایی موجود می‌گردد.

تحقیقات محدودی در ایران در رابطه با سازه‌های مصالح بنایی و همچنین بناهای تاریخی که میراث بسیار ارزشمندی می‌باشند صورت گرفته است. هر چند با ورود نرم‌افزارها و روش‌های عددی، امکان تحلیل و بررسی‌های دقیق و فراوانی برای محققین فراهم شده است، اما به دلیل پیچیدگی رفتار مصالح بنایی، هنوز راه زیادی در پیش می‌باشد.

این تحقیق به مدل سازی اجزاء محدود و نیز مقاوم سازی پانل مصالح بنایی تحت بار خارج از صفحه به وسیله کامپوزیت‌های FRP در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS پرداخته است. در این مطالعه یک دیوار مصالح بنایی تحت بار خارج از صفحه قرار گرفته و سپس با استفاده از ورقه‌های FRP تقویت شده است. برای مدل سازی دیوار مصالح بنایی از روش میکرو ساده استفاده شده و برای مدل سازی چسبندگی اولیه بین ملات و آجر، المان چسبنده مورد استفاده قرار گرفته است. برای شبیه سازی آجر که یک ماده ترد و شکننده می‌باشد از مادهٔ بتن موجود در کتاب‌خانه مواد از پیش تعریف شده نرم‌افزار استفاده گردیده است. در این تحقیق اثر سه نوع FRP، از جنس‌های شیشه، آرامید و کربن، همچنین آرایش‌های مختلف چسباندن ورقه‌های FRP که عبارتند از: تقویت دیوار در وجه کششی به صورت ساده با دو لایه FRP، تقویت دیوار در وجه کششی به صورت ضربدری، تقویت دیوار در وجه کششی به صورت شبکه، تقویت دیوار در وجه کششی به صورت ساده با چهار لایه FRP، و تقویت وجه کششی و فشاری دیوار، برای مقاوم

سازی دیوار استفاده شده است. در پایان اثر ضریب اصطکاک نیز در بررسی رفتار دیوار مورد بررسی قرار گرفته است.

بررسی نتایج به دست آمده نشان داد المان چسبنده، چسبندگی اولیه بین آجر و ملات را به خوبی شبیه سازی می‌کند و استفاده از ماده بتن برای شبیه سازی آجر مناسب می‌باشد، همچنین تقویت دیوار با ورقه‌های FRP شکل پذیری دیوار را تا حد قابل توجهی افزایش می‌دهد. با مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان مشخص گردید تقویت به صورت ضربدری نسبت به سایر آرایش‌ها شکل پذیری دیوار را با توجه به نوع بارگذاری صورت گرفته تا حد قابل قبولی افزایش می‌دهد. اثر سه نوع مختلف FRP در تقویت دیوار نشان داد استفاده از یک ماده سخت‌تر منجر به بروز یک رفتار تردتر از دیوار مصالح بنایی خواهد شد، البته اثر این پارامتر (نوع FRP) در آرایش-های مختلف متفاوت می‌باشد یعنی نوع آرایش نیز در بروز رفتار ترد و نرم تأثیر گذار می‌باشد. اثر ضرایب اصطکاک مختلف نشان داد، استفاده از ضریب اصطکاک بزرگ‌تر تا حدی منجر به افزایش باربری دیوار خواهد شد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول-کلیات

۱-۱- مقدمه..... ۱

۱-۲- ساختمان‌های مصالح بنایی تحت اثر زلزله..... ۴

۱-۳- نوآوری در ساختمان‌های مصالح بنایی..... ۶

۱-۴- روش‌های مرسوم مقاوم سازی دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح..... ۸

۱-۴-۱- معایب دیوار مصالح بنایی..... ۸

۱-۴-۲- روش‌های سنتی تقویت دیوارهای بنایی غیر مسلح..... ۹

۱-۴-۲-۱- پرکردن بازشوهای دیوار..... ۹

۱-۴-۲-۲- تعبیه روکش بتن مسلح در یک وجه یا هر دو وجه دیوار..... ۱۰

۱-۴-۲-۳- تعبیه روکش بتنی و کلاف‌های قائم..... ۱۴

۱-۴-۲-۴- استفاده از شبکه‌های جوش شده از مفتول به عنوان کلاف‌های افقی و قائم..... ۱۵

۱-۴-۲-۵- اضافه کردن دیوار جدید..... ۱۷

۱-۵- روش‌های جدید در تقویت ساختمان‌های مصالح بنایی..... ۱۸

۱-۵-۱- مقاوم سازی با میله‌های FRP ۱۸

۱-۵-۲- مقاوم سازی با ورقه‌های FRP ۲۰

۱-۶- مدل سازی عددی سازه‌های بنایی..... ۲۲

فصل دوم- مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- مروری بر تحقیقات گذشته ۲۵

فصل سوم- مشخصات مصالح بنایی و FRP

۳-۱- مقدمه..... ۳۹

۳-۲- مشخصات مصالح بنایی..... ۴۰

۳-۲-۱- نرم شدگی..... ۴۱

۳-۲-۲- آجر..... ۴۳

۳-۲-۳- ملات..... ۴۴

۳-۲-۴- مشخصات اتصال آجر و ملات..... ۴۵

۳-۲-۴-۱- گسیختگی کششی..... ۴۵

۳-۲-۴-۲- شکست برشی..... ۴۷

۳-۲-۵- مشخصات مجموعه کامپوزیت..... ۴۹

۳-۳- معرفی کامپوزیت‌های الیافی FRP ۵۴

۳-۳-۱- مزایای کامپوزیت‌های الیافی FRP ۵۵

۳-۳-۲- اجزای تشکیل دهندهٔ کامپوزیت‌های الیافی FRP ۵۶

۳-۳-۳- روش‌های ساخت مواد مرکب FRP ۵۷

۳-۳-۴- خصوصیات فیزیکی کامپوزیت‌های الیافی FRP ۵۹

۳-۳-۵- رزین‌ها..... ۶۲

فصل چهارم- تئوری‌های پلاستیسیته

۴-۱- مقدمه..... ۶۴

۴-۲- بررسی رفتار پلاستیک بتن..... ۶۵

۴-۳- مفاهیم مورد نیاز برای تعیین سطح تسلیم..... ۶۷

۴-۴- خصوصیات کلی سطح تسلیم بتن..... ۷۱
۴-۵- معرفی اجمالی تئوری‌های مختلف تسلیم..... ۷۳
۴-۶- رفتار پس از تسلیم..... ۷۶
۴-۷- معرفی تئوری پلاستیسیته مورد استفاده در این مطالعه..... ۷۹
۴-۷-۱- تابع پتانسیل جریان..... ۷۹
۴-۷-۲- سطوح بار..... ۸۱
۴-۸- مدل اصطکاکی کولمب..... ۸۳
۴-۸-۱- فرمول بندی چسبندگی الاستیک..... ۸۵

فصل پنجم – مدل سازی دیوار آجری و بررسی صحت مدل سازی

۵-۱- مقدمه..... ۸۹
۵-۲- کلیات در مورد نرم‌افزار..... ۹۰
۵-۳- مدل سازی ماده بتن در نرم‌افزار ABAQUS ۹۱
۵-۳-۱- رفتار مکانیکی در پلاستیسیته بتن آسیب دیده..... ۹۳
۵-۳-۲- رفتار کششی و فشاری تک محوری بتن..... ۹۳
۵-۳-۳- تعریف سخت شوندگی کششی..... ۹۵
۵-۳-۳-۱- رابطه تنش-کرنش پس از شکست..... ۹۵
۵-۳-۳-۲- معیار انرژی شکست ترک خوردگی..... ۹۷
۵-۳-۴- تعریف رفتار کششی بتن برای منشور بتنی..... ۹۹
۵-۳-۵- تعریف رفتار فشاری..... ۱۰۰
۵-۳-۶- رفتار فشاری بتن برای منشور بتنی..... ۱۰۱
۵-۴- حل مسائل غیر خطی توسط نرم‌افزار..... ۱۰۱

۵-۴-۱- گام..... ۱۰۲
۵-۴-۲- نمو..... ۱۰۳
۵-۴-۳- تکرار..... ۱۰۳
۵-۴-۴- همگرایی..... ۱۰۳
۵-۵- مشخصات هندسی منشور بتنی..... ۱۰۶
۵-۶- تعریف ماده بتن به نرم افزار..... ۱۰۷
۵-۷- بارگذاری..... ۱۰۸
۵-۸- شبکه بندی..... ۱۰۸
۵-۹- اجرای برنامه و مشاهده تنش در منشور..... ۱۰۹
۵-۱۰- مشاهده نتایج..... ۱۱۰
۵-۱۱- نتیجه گیری..... ۱۱۳
۵-۱۲- مدل سازی دیوار مصالح بنایی..... ۱۱۴
۵-۱۲-۱- المان‌های چسبنده..... ۱۱۵
۵-۱۲-۲- اتصال المان‌های چسبنده به سایر قطعات..... ۱۱۹
۵-۱۲-۳- ایجاد برخورد بین قطعات مجاور المان چسبنده..... ۱۲۱
۵-۱۲-۴- نحوهٔ تنظیم پارامترهای المان چسبنده برای مدل سازی جداشدگی..... ۱۲۳
۵-۱۲-۵- مدل سازی FRP در نرم افزار ABAQUS ۱۲۴
۵-۱۲-۶- چگونگی مدل سازی برخورد (تماس) در نرم‌افزار ABAQUS ۱۲۹
۵-۱۲-۷- تحلیل سازه به روش صریح..... ۱۳۲
۵-۱۲-۸- مدل سازی دیوار مصالح بنایی تحت بار خارج از صفحه..... ۱۳۵
۵-۱۲-۸-۱- مشخصات هندسی دیوار..... ۱۳۵

۵-۱۲-۸-۲- بارگذاری و شرایط مرزی..... ۱۳۵
۵-۱۲-۸-۳- مشخصات مصالح مورد استفاده..... ۱۳۷
۵-۱۲-۸-۴-شبکه بندی..... ۱۳۸
۵-۱۲-۸-۵- حساسیت مش..... ۱۳۹
۵-۱۲-۸-۶- مشاهده نتایج..... ۱۴۱

فصل ششم – بررسی رفتار خارج از صفحه دیوار مصالح بنایی تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP

۶-۱- مقدمه ۱۴۴
۶-۲- نحوه تقویت دیوار به وسیله FRP ۱۴۵
۶-۳- بارگذاری و شرایط مرزی..... ۱۴۵
۶-۴- تقویت دیوار در وجه کششی به طور ساده با دو لایه FRP ۱۴۶
۶-۴-۱- مشاهده نتایج مربوط به تقویت دیوار در وجه کششی به طور ساده با دو لایه FRP... ۱۴۷
۶-۵- تقویت دیوار در وجه کششی به صورت ضربدری..... ۱۵۰
۶-۵-۱- مشاهده نتایج مربوط به تقویت دیوار در وجه کششی به صورت ضربدری..... ۱۵۰
۶-۶- تقویت دیوار در وجه کششی به صورت شبکه..... ۱۵۳
۶-۶-۱- مشاهده نتایج مربوط به تقویت دیوار در وجه کششی به صورت شبکه..... ۱۵۴
۶-۷- تقویت دیوار در وجه کششی با چهار لایه الیاف FRP ۱۵۷
۶-۷-۱- مشاهده نتایج مربوط به تقویت دیوار در وجه کششی با چهار لایه الیاف FRP ۱۵۸
۶-۸- تقویت دیوار در وجه کششی و فشاری با الیاف FRP ۱۶۰
۶-۸-۱- مشاهده نتایج مربوط به تقویت دیوار در وجه کششی و فشاری با الیاف FRP..... ۱۶۱
۶-۹- بررسی اثر ضریب اصطکاک..... ۱۶۴

فصل هفتم – نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱- خلاصه.....۱۶۵

۷-۲- نتایج تحقیق.....۱۶۶

۷-۳- پیشنهادات.....۱۶۷

پیوست ۱ .....۱۶۹

مراجع.....۱۷۷

فهرست جداول

شماره و عنوان جدول **صفحه**

جدول ۳-۱: حداقل مقاومت آجر طبق استاندارد ۴۳

جدول ۳-۲: انواع ملات و مقاومت فشاری آنها ۴۴

جدول ۳-۳: چگالی انواع مختلف FRP و فولاد ۵۹

جدول ۳-۴: ضریب انبساط حرارتی انواع FRP ۵۹

جدول ۳-۵: مشخصات مکانیکی انواع الیاف ۶۱

جدول ۳-۶: مشخصات مکانیکی انواع الیاف ۶۱

جدول ۳-۷: مقایسه مشخصات رزین اپوکسی، بتن وفولاد..... ۶۳

جدول ۵-۱: مشخصات الاستیک منشور بتنی ۱۰۷

جدول ۵-۲: مشخصات در نظر گرفته شده برای آجر ۱۱۴

جدول ۵-۳: مشخصات آجر ۱۳۷

جدول ۵-۴: مشخصات درز ملات ۱۳۷

جدول ۵-۵: مشخصات FRP ۱۳۷

جدول ۶-۱: مشخصات انواع FRP..... ۱۴۶

جدول ۶-۲: تقویت دیوار در وجه کششی به طور ساده با دو لایه FRP..... ۱۴۹

جدول ۶-۳: تقویت دیوار در وجه کششی به صورت ضربدری..... ۱۵۳

جدول ۶-۴: تقویت دیوار در وجه کششی به صورت شبکه ۱۵۷

جدول ۶-۵: تقویت دیوار در وجه کششی به صورت چهار لایه ۱۶۰

جدول ۶-۶: تقویت دیوار در وجه کششی و فشاری ۱۶۴

فهرست اشکال

شماره و عنوان شکل **صفحه**

شکل ۱-۱: آمار ساختمان سازی در برخی کشورهای اروپایی ۳

شکل ۱-۲: طرح پیشنهادی پیرو گیلوریو ۵

شکل ۱-۳: الف)زلزله لیسبون، ب) تالار پومبالاین ۵

شکل ۱-۴: عکس‌هایی از خسارات زلزله ۶

شکل ۱-۵: نوآوری‌های انجام شده در ساخت مصالح و ساختمان‌های مصالح بنایی ۷

شکل ۱-۶: پر کردن بازشوهای دیوار ۱۰

شکل ۱-۷: تقویت دیوار بنایی با روکش بتن مسلح در یک وجه یا هر دو وجه دیوار ۱۱

شکل ۱-۸: برداشتن آجر برای اتصال بهتر شبکه مش با دیوار ۱۲

شکل ۱-۹: تقویت پی با ادامه دادن روکش بتنی روی پی ۱۳

شکل ۱-۱۰: امتداد شبکه آرماتور در طبقه فوقانی ۱۴

شکل ۱-۱۱: روکش بتنی و کلاف قائم در سطح خارجی دیوار ۱۵

شکل ۱-۱۲: استفاده از شبکه‌های جوش شده از مفتول ۱۶

شکل ۱-۱۳: استفاده از آرماتورهای ریشه ۱۶

شکل ۱-۱۴: جزئیات اتصال دیوار قدیم به دیوار جدید ۱۷

شکل ۱-۱۵: تقویت دیوار مصالح بنایی در محل بازشو ۱۸

شکل ۱-۱۶: اجرای شماتیک از میله‌های FRP ۱۹

شکل ۱-۱۷: مسجد عابده خاتون که با میله‌های FRP تقویت شده است ۲۰

شکل ۱-۱۸: جزئیات اجرایی مسجد عابده خاتون ۲۰

شکل ۱-۱۹: سطح خارجی طاق مصالح بنایی ۲۱

شکل ۱-۲۰: جزئیات اتصال ورقه FRP و میله مهاری ۲۱
شکل ۱-۲۱: کلیسای آچن در کشور آلمان ۲۲
شکل ۱-۲۲: مدل کلیسا به روش ماکرو در نرم‌افزار ANSYS ۲۳
شکل ۱-۲۳: همگن سازی ماده مصالح بنایی ۲۳
شکل ۱-۲۴: یک مدل میکرو الف) مدل میکرو جزئی، ب) مدل میکرو ساده ۲۴
شکل ۳-۱: دیوار آجری ۴۱
شکل ۳-۲: منحنی شماتیک مصالح نرم شونده ۴۲
شکل ۳-۳: ترک‌های مرزی بین ملات و آجر ۴۵
شکل ۳-۴: آزمایش‌های متداول برای تعیین مقاومت کششی ۴۶
شکل ۳-۵: سطح مقطع مؤثر در آزمایش کشش مستقیم ۴۷
شکل ۳-۶: انواع آزمایش‌های تعیین مقاومت برشی درز ملات ۴۸
شکل ۳-۷: روش اصلاح شده آزمایش دوتایی ۴۸
شکل ۳-۸: اثر تورم ۴۹
شکل ۳-۹: مشخصات ابعادی نمونه RILEM ۵۰
شکل ۳-۱۰: نمودار تنش-کرنش آجر کاری در مقایسه با ملات و آجر ۵۱
شکل ۳-۱۱: وضعیت تنش در آجر و ملات تحت اثر بار محوری ۵۲
شکل ۳-۱۲: شکست کششی آجر کاری ۵۲
شکل ۳-۱۳: مدهای شکست آجر کاری ۵۴
شکل ۳-۱۴: نمونه‌هایی از ورقه‌های الیافی FRP ۵۷
شکل ۳-۱۵: نحوهٔ اجرای ورقه‌های الیافی FRP ۵۸
شکل ۳-۱۶: انواع ورقه‌های کامپوزیت الیافی FRP ۶۰

شکل ۴-۱: نمودار تنش-کرنش بتن ۶۵
شکل ۴-۲: سطح گسیختگی در حالت تنش صفحه‌ای ۶۷
شکل ۴-۳: فضای تنش‌های اصلی ۶۷
شکل ۴-۴: صفحه انحرافی و مقطع عرضی یک سطح گسیختگی ۷۰
شکل ۴-۵: وضعیت تغییر حجم ۷۰
شکل ۴-۶: منحنی نصف‌النهاری به دست آمده از مطالعات تجربی ۷۲
شکل ۴-۷: سطح تسلیم رانکین ۷۳
شکل ۴-۸: سطح تسلیم ون مایسز و مثلث رانکین ۷۴
شکل ۴-۹: سطح تسلیم دراکر-پراگر ۷۶
شکل ۴-۱۰: سطح تسلیم ویلیام-وارنک ۷۶
شکل ۴-۱۱: نمودار تنش-کرنش ۷۷
شکل ۴-۱۲: تابع پتانسیل جریان ۸۰
شکل ۴-۱۳: اثر مقدار K_C روی مقطع عرضی سطح بار ۸۲
شکل ۴-۱۴: ناحیه لغزشی برای مدل اصطکاکی کولمب ۸۴
شکل ۵-۱: رابطه تنش-کرنش بتن ۹۴
شکل ۵-۲: رابطه کرنش ترک خوردگی برای تعریف سخت شوندگی کششی ۹۶
شکل ۵-۳: منحنی تنش-جابجایی پس از شکست ۹۷
شکل ۵-۴: منحنی تنش-جابجایی پس از شکست ۹۸
شکل ۵-۵: رابطه تنش-کرنش فشاری بتن در ABAQUS ۱۰۰
شکل ۵-۶: منحنی هاگنستاد ۱۰۱
شکل ۵-۷: منحنی بار-تغییر مکان غیر خطی ۱۰۲

شکل ۵-۸: نیروهای داخلی و خارجی وارد بر یک جسم ۱۰۴
شکل ۵-۹: اولین تکرار در یک نمو ۱۰۴
شکل ۵-۱۰: تکرار دوم ۱۰۶
شکل ۵-۱۱: هندسه منشور بتنی ۱۰۷
شکل ۵-۱۲: بارگذاری و شرایط مرزی مدل ۱۰۸
شکل ۵-۱۳: انواع المان ۱۰۹
شکل ۵-۱۴: منشور بتنی پس از بارگذاری ۱۰۹
شکل ۵-۱۵: اثر زاویه اتساع بر روی نمودار تنش-کرنش ۱۱۰
شکل ۵-۱۶: اثر σ_{t0} بر روی نمودار تنش-کرنش..... ۱۱۰
شکل ۵-۱۷: اثر عرض ترک بر روی نمودار تنش-کرنش ۱۱۱
شکل ۵-۱۸: اثر پارامتر σ_{t0}/σ_{c0} بر روی نمودار تنش-کرنش ۱۱۱
شکل ۵-۱۹: اثر پارامتر ویسکوزیته بر روی نمودار تنش-کرنش ۱۱۲
شکل ۵-۲۰: اثر پارامتر k_c بر روی نمودار تنش-کرنش..... ۱۱۲
شکل ۵-۲۱: استفاده از منحنی هاگنستاد اصلاح شده در تعریف رفتار فشاری بتنو همچنین اثر زاویه اتساع۱۱۳
شکل ۵-۲۲: رابطهٔ تنش بین سطحی- تغییر مکان نسبی با شاخه نزولی خطی ۱۱۸
شکل ۵-۲۳: رابطهٔ تنش بین سطحی-تغییر مکان نسبی با شاخه نزولی نمایی..... ۱۱۸
شکل ۵-۲۴: به اشتراک گذاشتن گره‌ها ۱۱۹
شکل ۵-۲۵: بستن سطوح به یک‌دیگر..... ۱۲۰
شکل ۵-۲۶: ایجاد برخورد بین المان چسبنده و سایر قطعات..... ۱۲۱
شکل ۵-۲۷: ایجاد برخورد بین قطعات مجاور المان چسبنده..... ۱۲۲
شکل ۵-۲۸: نمایی از یک ماده کامپوزیت ۱۲۵

شکل ۵-۲۹: مقاطع پوسته‌ای ماده مرکب ۱۲۶
شکل ۵-۳۰: نحوه چینش لایه‌ها در جدول ۱۲۷
شکل ۵-۳۱: نحوه تعریف دستگاه مختصات ۱۲۷
شکل ۵-۳۲: زاویه چرخش ۱۲۸
شکل ۵-۳۳: روش تماس گره به سطح ۱۳۰
شکل ۵-۳۴: مقایسه دقت فشار تماسی در دو نوع تماس گره به سطح و سطح به سطح ۱۳۰
شکل ۵-۳۵: رابطه فشار- فرورفتگی محل تماس ۱۳۲
شکل ۵-۳۶: میله چهار گرهی تحت نیروی محوری برای تحلیل صریح ۱۳۳
شکل ۵-۳۷: وضعیت میله تحت بار محوری در گام زمانی اول ۱۳۴
شکل ۵-۳۸: وضعیت میله تحت بار محوری در گام زمانی دوم ۱۳۴
شکل ۵-۳۹: وضعیت میله تحت بار محوری در ابتدای گام زمانی سوم ۱۳۵
شکل ۵-۴۰: دیوار آزمایش شده توسط تان ۱۳۶
شکل ۵-۴۱: محل قرار گیری میلگردها ۱۳۶
شکل ۵-۴۲: دامنه نیروی اعمالی به صفحه فلزی ۱۳۷
شکل ۵-۴۳: الف) المان C3D8R و COH3D8، ب) المان R3D4 ..... ۱۳۸
شکل ۵-۴۴: المانS4R ۱۳۸
شکل ۵-۴۵: انواع مختلف شبکه بندی..... ۱۳۹
شکل ۵-۴۶: کانتور تنش در دیوار بدون تقویت ۱۴۱
شکل ۵-۴۷: نمودار بار-تغییر مکان نمونه بدون تقویت ۱۴۲
شکل ۵-۴۸: نحوه تقویت دیوار..... ۱۴۲
شکل ۵-۴۹: کانتور تنش در دیوار تقویت شده ۱۴۲

شکل ۵-۵۰: نمودار بار-تغییر مکان دیوار تقویت شده..... ۱۴۳
شکل ۶-۱: محل قرار گیری میلگردها ۱۴۵
شکل ۶-۲: دامنه نیروی اعمالی به صفحه فلزی ۱۴۶
شکل ۶-۳: نحوه تقویت پانل ۱۴۶
شکل ۶-۴: کانتور تنش در دیوار تقویت شده با دو لایه FRP..... ۱۴۷
شکل ۶-۵: تقویت دیوار با ورقه شیشه ۱۴۷
شکل ۶-۶: تقویت دیوار با ورقه آرامید ۱۴۸
شکل ۶-۷: تقویت دیوار با ورقه کربن ۱۴۸
شکل ۶-۸: تقویت دیوار در وجه کششی به طور ساده ۱۴۹
شکل ۶-۹: تقویت دیوار به صورت ضربدری ۱۵۰
شکل ۶-۱۰: کانتور تنش در دیوار تقویت شده به صورت ضربدری ۱۵۰
شکل ۶-۱۱: تقویت دیوار به صورت ضربدری با الیاف شیشه ۱۵۱
شکل ۶-۱۲: تقویت دیوار به صورت ضربدری با الیاف آرامید ۱۵۲
شکل ۶-۱۳: تقویت دیوار به صورت ضربدری با الیاف کربن ۱۵۲
شکل ۶-۱۴: تقویت دیوار در وجه کششی به صورت ضربدری ۱۵۳
شکل ۶-۱۵: تقویت دیوار به صورت شبکه ۱۵۴
شکل ۶-۱۶: کانتور تنش در دیوار تقویت شده به صورت شبکه ۱۵۴
شکل ۶-۱۷: تقویت دیوار به صورت شبکه با الیاف شیشه ۱۵۴
شکل ۶-۱۸: تقویت دیوار به صورت شبکه با الیاف آرامید ۱۵۵
شکل ۶-۱۹: تقویت دیوار به صورت شبکه با الیاف کربن ۱۵۶
شکل ۶-۲۰: تقویت دیوار در وجه کششی به صورت شبکه ۱۵۶

شکل ۶-۲۱: تقویت دیوار با چهار لایه FRP..... ۱۵۷
شکل ۶-۲۲: : کانتور تنش در دیوار تقویت شده با چهار لایه الیاف FRP ۱۵۸
شکل ۶-۲۳: تقویت دیوار به صورت چهار لایه با الیاف شیشه ۱۵۸
شکل ۶-۲۴: تقویت دیوار به صورت چهار لایه با الیاف آرامید ۱۵۹
شکل ۶-۲۵: تقویت دیوار به صورت چهار لایه با الیاف کربن ۱۵۹
شکل ۶-۲۶: تقویت دیوار به صورت چهار لایه ۱۶۰
شکل ۶-۲۷: تقویت دیوار در وجه کششی و فشاری با الیاف FRP ۱۶۱
شکل ۶-۲۸: کانتور تنش در دیوار تقویت شده در وجه کششی و فشاری ۱۶۱
شکل ۶-۲۹: تقویت دیوار در وجه کششی و فشاری با الیاف شیشه ۱۶۱
شکل ۶-۳۰: تقویت دیوار در وجه کششی و فشاری با الیاف آرامید ۱۶۲
شکل ۶-۳۱: تقویت دیوار در وجه کششی و فشاری با الیاف کربن ۱۶۳
شکل ۶-۳۲: تقویت دیوار در وجه کششی و فشاری ۱۶۳
شکل ۶-۳۳: اثر ضریب اصطکاک بر روی نمودار بار-تغییر مکان ۱۶۴
شکل پ ۱-۱: معیار تسلیم موهر کولمب ۱۶۹
شکل پ۱-۲: مدل موهر-کولمب در صفحه انحرافی ۱۷۰
شکل پ۱-۳: معیار تسلیم موهر-کولمب در صفحهٔ انحرافی و نصف‌النهاری ۱۷۳
شکل پ۱-۴: گروه پتانسیل جریان هذلولی در صفحه نصف‌النهاری ۱۷۴
شکل پ۱-۵: پتانسیل ویلیام-مِن‌تری در صفحه انحرافی ۱۷۵