بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه ارومیّه**

**دانشکده فنی ومهندسی**

**گروه مهندسی عمران**

**پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران– سازه**

# تحلیل و طراحی سازه‌های شبکه دولایه‌ی فضاکار در برابر خرابی پیشرونده

**استاد راهنما:**

**دکتر محمدرضا شیدایی**

**اساتید داور:**

**دکتر سعید تاروردیلو** **دکتر حبیب سعید منیر**

**تنظیم و نگارش:**
**امین مشتاق**

**دی‌ماه ۱۳۹۱**

**حق چاپ و نشر برای دانشگاه ارومیه محفوظ می‌باشد**

تقدیم به

# همه ی عزیزانم

خدا را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از میوه وجودشان در راه کسب علم و دانش بهره‌مند گردم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این فرشتگان، پس از پروردگار، مایه ی هستی‌ام بوده‌اند، بزرگوارانی که عاشقانه سوختند تا روشنگر راهم باشند و گرمابخش وجودم. پروردگارا، نه می‌توانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دست‌های پینه بسته‌شان که ثمره تلاش برای افتخار من بوده، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکرگزارشان باشم و ثانیه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

در پایان این پایان نامه را به همسر مهربانم، اسطوره زندگیم، پناه خستگیم و امید بودنم تقدیم می کنم، به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است. همدلی که با واژه ی نجیب و مغرور تلاش؛ آشنایی دارد و تلاش را ستین را می شناسد و عطر رویایی آن را استشمام می کند و مرا در راه رسیدن به اهداف عالی یاری می رساند؛ همو که حس تعهد و مسئولیت را در زندگی‌مان تلالویی خدایی داده است و صبورانه و صادقانه من را همراهی نموده است تا بتوانم در کمال آرامش و آسایش به تهیه و تنظیم پایان نامه بپردازم.

# تشکر و قدردانی

رسول خدا فرمودند:

«من علّمنی حرفاً فقد صیّرنی عبداً»

هر کس به من کلمه ای بیاموزد، مرا بنده ی خود کرده است.

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 نعمت هایش را شماره ای نباشد. او که هنگام رحمت، ارحم الراحمین و در غوغای عقوبت، اشد المعاقبین است. حال که به لطف پروردگار این کار به انجام رسیده، بر خود لازم می دانم از عزیزانی که مرا در این راه یاری نموده اند سپاسگزاری نمایم. از جناب آقای دکتر محمدرضا شیدایی که بار، همنموده‌ای خود، محور حمایت اینجانب در این مسیر بوده اند بسیار سپاس گزارم. همچنین بر خود لازم می دانم از تمامی اساتید گروه مهندسی عمران که در طول تحصیل مرا یاری نمودند به خصوص جناب آقایان دکتر سعید تاروردیلو و حبیب سعیدمنیر که زحمت داوری این پایان نامه را به عهده داشتند، تشکر ویژه ای نمایم.

با تشکر از لطف بی دریغ پدر و مادر مهربانم که از هیچ چیز در راه آموزش و پرورشم دریغ نکردند و همسر عزیزم که همواره مشوق من است. همچنین از برادرانم که همواره و در تمام مراحل زندگی یار و پشتیبان اینجانب بوده اند سپاس گزارم. در انتها، صمیمانه ترین سپاس ها را به تمامی کسانی که همواره از هیچ کوششی در کمک به اینجانب دریغ ننمودند، تقدیم می دارم.

امین مشتاق

# فهرست مطالب

**فصل اول : مقدمه ..... ۱**

مقدمه ..... ۲

**فصل دوم : بررسی منابع و مروری بر مطالعات انجام یافته ..... ۵**

۲-۱ مقدمه ..... ۶
۲-۲ خرابی پیشرونده ..... ۷
۲-۲-۱ مفهوم خرابی پیشرونده و تاریخچه‌ی آن ..... ۷
۲-۲-۲ عوامل بوجود آورنده‌ی خرابی پیشرونده ..... ۱۶
۲-۲-۳ مطالعات انجام‌شده پیرامون خرابی پیشرونده در ساختمان‌ها ..... ۱۸
۲-۳ آشنایی با شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار ..... ۲۱
۲-۳-۱ تعریف ..... ۲۱
۲-۳-۲ اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سازه‌های فضاکار ..... ۲۱
۲-۳-۳ مزایای سازه‌های فضاکار ..... ۲۱
۲-۳-۴ شبکه‌ها ..... ۲۳
۲-۳-۴-۱ شبکه‌های تخت تک‌لایه ..... ۲۳
۲-۳-۴-۲ شبکه‌های دولایه ..... ۲۴
۲-۴ مشخصات رفتاری شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار ..... ۲۶
۲-۵ انواع رفتار خرابی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار ..... ۲۹
۲-۵-۱ خرابی کلی سازه ..... ۳۰
۲-۵-۲ خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی ..... ۳۰
۲-۵-۳ خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی ..... ۳۰
۲-۶ رفتار کمانشی عضو فشاری ..... ۳۲
۲-۷ تحلیل استاتیکی غیرخطی خرابی در سازه‌ها ..... ۳۴
۲-۸ تحلیل استاتیکی خرابی پیشرونده در شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار ..... ۳۵
۲-۹ تحلیل دینامیکی خرابی پیشرونده در شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار ..... ۳۶
۲-۹-۱ تحلیل دینامیکی فروجهش به روش مبتنی بر انرژی ..... ۳۸
۲-۹-۲ تحلیل دینامیکی فروجهش به روش مبتنی بر سختی با اعمال بار رامپی ..... ۴۰
۲-۹-۳ تحلیل دینامیکی فروجهش به روش مبتنی بر سختی ..... ۴۱
۲-۱۰ مقایسه روشهای تحلیل واکنش دینامیکی فروجهش سازه ..... ۴۳
۲-۱۱ روشهای مقاوم‌سازی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار در برابر خرابی پیشرونده ..... ۴۵
۲-۱۱-۱ روش کنترل حادثه ..... ۴۵
۲-۱۱-۲ روش طراحی غیر مستقیم برای مقاوم‌سازی شبکه‌ی دولایه‌ی فضاکار ..... ۴۵
۲-۱۱-۲-۱ شکل‌پذیری ..... ۴۷

۲-۱۱-۲-۱-۱ طرح دست بالای اعضای فشاری و طرح دست پائین اعضای کششی ..... ۴۷
۲-۱۱-۲-۱-۲ استفاده از ابزار محدودکننده نیرو برای جلوگیری از کمانش عضو فشاری ..... ۴۷
۲-۱۱-۲-۲ نحوه‌ی توزیع نیروها ..... ۵۰
۲-۱۱-۳ روش طراحی مستقیم برای مقاوم‌سازی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار ..... ۵۱
۲-۱۱-۳-۱ روش مقاوم‌سازی محلی ویژه ..... ۵۲
۲-۱۱-۳-۲ روش مسیر جایگزین ..... ۵۳
۲-۱۲ نتیجه گیری ..... ۵۳

**فصل سوم : مطالعه‌ی رفتار خرابی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار ..... ۵۴**

۳-۱ مقدمه ..... ۵۵
۳-۲ مدل‌های تحلیلی ..... ۵۶
۳-۲-۱ مشخصات کلی نمونه‌ها ..... ۵۶
۳-۲-۲ بارگذاری و طراحی مدلها ..... ۶۱
۳-۳ بررسی اثر زاویه‌ی اعضای قطری لایه‌ی میانی ..... ۶۳
۳-۴ بررسی اثرات انواع تیپ‌بندی اعضای شبکه بر مشخصات کلی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار ..... ۶۴
۳-۵ مدل‌سازی رفتار کمانشی اعضا ..... ۶۵
۳-۶ ارزیابی رفتار خرابی مدل‌های شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار ..... ۸۰
۳-۶-۱ کلیات ..... ۸۰
۳-۶-۱-۱ تحلیل استاتیکی خرابی سازه ..... ۸۰
۳-۶-۱-۲ تحلیل دینامیکی فروجهش سازه ..... ۸۰
۳-۶-۱-۳ مدل‌سازی شبکه‌ی تخت دولایه‌ی فضاکار در نرم‌افزار OpenSees ..... ۸۳
۳-۶-۲ رفتار خرابی مدل $DLG_{20\times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ ..... ۸۴
۳-۶-۳ رفتار خرابی مدل $DLG_{20\times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}2}$ ..... ۸۸
۳-۶-۴ رفتار خرابی مدل $DLG_{20\times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}3}$ ..... ۹۱
۳-۶-۵ رفتار خرابی مدل $DLG_{20\times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}4}$ ..... ۹۴
۳-۶-۶ رفتار خرابی مدل $DLG_{20\times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}5}$ ..... ۹۷
۳-۶-۷ رفتار خرابی مدل $DLG_{20\times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ ..... ۱۰۰
۳-۷ مقایسه نتایج تحلیل رفتار خرابی مدلهای $DLG_{20\times 20\text{-}5\text{-}45}$ ..... ۱۰۴
۳-۸ نتیجه گیری ..... ۱۰۷

**فصل چهارم : مقاوم‌سازی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار ..... ۱۱۰**

۴-۱ مقدمه ..... ۱۱۱
۴-۲ روند ۱ مقاوم‌سازی (سطح مقطع) ..... ۱۱۳
۴-۳ روند ۲ مقاوم‌سازی (سطح مقطع و لاغری) ..... ۱۱۸
۴-۴ روند ۳ مقاوم‌سازی (DCR) ..... ۱۲۲
۴-۵ روند ۴ مقاوم‌سازی (DCR اصلاح شده) ..... ۱۲۶

۴-۶ بررسی اثر ابعاد چشمه و دهانه بر روند مقاوم‌سازی ..... ۱۳۰
۴-۷ کاربرد میراگر شکافدار لوله‌ای فولادی (CSSD) بر رفتار خرابی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار ..... ۱۳۴
۴-۷-۱ معرفی میراگر شکافدار لوله‌ای فولادی ( CSSD) ..... ۱۳۵
۴-۷-۲ مدل‌سازی میراگر شکافدار لوله‌ای فولادی ( CSSD) در شبکه‌ی تخت دولایه‌ی فضاکار ..... ۱۳۷
۴-۷-۳ بررسی نتایج تحلیل خرابی شبکه‌ی تخت دولایه‌ی فضاکار در حضور و عدم حضور میراگر ..... ۱۴۰
۴-۸ نتیجه گیری ..... ۱۴۳

**فصل پنجم : خلاصه و نتیجه گیری ..... ۱۴۴**

۵-۱ خلاصه ..... ۱۴۵
۵-۲ نتیجه گیری ..... ۱۴۷
۵-۳ پیشنهادات برای تحقیقات آتی ..... ۱۴۹

**منابع و ماخذ ..... ۱۵۰**

**چکیده انگلیسی ..... ۱۵۸**

# فهرست جداول

**فصل سوم : مطالعه‌ی رفتار خرابی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار** ..... ۵۴

جدول ۳-۱ : بارگذاری گره‌ای مدل‌های مورد مطالعه ..... ۶۱
جدول ۳-۲ : شرایط تکیه‌گاهی گوشه‌ای مدل‌های مورد مطالعه ..... ۶۲
جدول ۳-۳ : حدود مجاز تغییر مکان قائم گره‌ی میانی لایه‌ی پایین مدل‌های مورد مطالعه ..... ۶۲
جدول ۳-۴ : ترکیبات طراحی بار مدل‌های مورد مطالعه ..... ۶۳
جدول ۳-۵ : تیپ‌بندی و مشخصات اعضای مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}30}$ ..... ۶۴
جدول ۳-۶ : تیپ‌بندی و مشخصات اعضای مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45}$ ..... ۶۵
جدول ۳-۷ : تیپ‌بندی و مشخصات اعضای مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}60}$ ..... ۶۶
جدول ۳-۸ : تیپ‌بندی و مشخصات اعضای مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ ..... ۶۷
جدول ۳-۹ : تیپ‌بندی و مشخصات اعضای مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}2}$ ..... ۶۷
جدول ۳-۱۰ : تیپ‌بندی و مشخصات اعضای مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}3}$ ..... ۶۸
جدول ۳-۱۱ : تیپ‌بندی و مشخصات اعضای مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}4}$ ..... ۶۸
جدول ۳-۱۲ : تیپ‌بندی و مشخصات اعضای مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}5}$ ..... ۶۹
جدول ۳-۱۳ : تیپ‌بندی و مشخصات اعضای مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ ..... ۷۰
جدول ۳-۱۴ : تیپ‌بندی کل اعضای مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ ..... ۷۱
جدول ۳-۱۵ : مشخصات میرایی مدل‌های مورد مطالعه ..... ۸۲
جدول ۳-۱۶ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل استاتیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ ..... ۸۴
جدول ۳-۱۷ : اطلاعات مربوط به تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ ..... ۸۴
جدول ۳-۱۸ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ ..... ۸۶
جدول ۳-۱۹ : مشخصات اعضای بحرانی مدل ..... ۸۷
جدول ۳-۲۰ : مشخصات سازه مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ هنگام وقوع خرابی ۵ عضو بحرانی ..... ۸۷
جدول ۳-۲۱ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل استاتیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}2}$ ..... ۸۸
جدول ۳-۲۲ : اطلاعات مربوط به تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}2}$ ..... ۸۸
جدول ۳-۲۳ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}2}$ ..... ۹۰
جدول ۳-۲۴ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل استاتیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}3}$ ..... ۹۱
جدول ۳-۲۵ : اطلاعات مربوط به تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}3}$ ..... ۹۱
جدول ۳-۲۶ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}3}$ ..... ۹۳
جدول ۳-۲۷ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل استاتیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}4}$ ..... ۹۴
جدول ۳-۲۸ : اطلاعات مربوط به تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}4}$ ..... ۹۴
جدول ۳-۲۹ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}4}$ ..... ۹۶
جدول ۳-۳۰ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل استاتیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}5}$ ..... ۹۷

جدول ۳-۳۱ : اطلاعات مربوط به تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}5}$ ..... ۹۷
جدول ۳-۳۲ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}5}$ ..... ۹۹
جدول ۳-۳۳ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل استاتیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ ..... ۱۰۰
جدول ۳-۳۴ : اطلاعات مربوط به تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ ..... ۱۰۰
جدول ۳-۳۵ : اطلاعات مربوط به سطح بار حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ ..... ۱۰۲
جدول ۳-۳۶ : مشخصات اعضای بحرانی مدل ..... ۱۰۳
جدول ۳-۳۷ : مشخصات سازه مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ هنگام وقوع خرابی ۵ عضو بحرانی ..... ۱۰۳
جدول ۳-۳۸ : ضرایب IDF بدست‌آمده از نتایج تحلیل و رابطه‌ی ۳-۵ ..... ۱۰۶

**فصل چهارم : مقاوم‌سازی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار ..... ۱۱۰**

جدول ۴-۱ : مشخصات عضو بحرانی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ قبل از مرحله‌ی ۱ روند ۱ مقاوم‌سازی ..... ۱۱۳
جدول ۴-۲ : مشخصات اعضای مقاوم‌سازی شده مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مرحله‌ی ۱ روند ۱ ..... ۱۱۴
جدول ۴-۳ : شماره اعضای خراب شده مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مقاوم‌سازی مرحله‌ی ۱ روند ۱ ..... ۱۱۴
جدول ۴-۴ : اصلاحیه مقاوم‌سازی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مقاوم‌سازی مرحله‌ی ۱ روند ۱ ..... ۱۱۵
جدول ۴-۵ : مشخصات عضو بحرانی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مرحله‌ی ۱ روند ۱ مقاوم‌سازی ..... ۱۱۵
جدول ۴-۶ : مشخصات اعضای مقاوم‌سازی شده مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مرحله‌ی ۱ روند ۱ ..... ۱۱۶
جدول ۴-۷ : مشخصات عضو بحرانی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ پس از مرحله‌ی ۱ روند ۱ مقاوم‌سازی ..... ۱۱۶
جدول ۴-۸ : مشخصات اعضای مقاوم‌سازی شده مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در مرحله‌ی ۱ روند ۱ ..... ۱۱۷
جدول ۴-۹ : مشخصات اعضای ایمن شده در برابر خرابی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ پس از روند ۱ ..... ۱۱۷
جدول ۴-۱۰ : مشخصات عضو بحرانی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ قبل از مرحله‌ی ۱ روند ۱ مقاوم‌سازی ..... ۱۱۸
جدول ۴-۱۱ : مشخصات اعضای مقاوم‌سازی شده مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مرحله‌ی ۱ روند ۲ ..... ۱۱۹
جدول ۴-۱۲ : اصلاحیه مقاوم‌سازی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مقاوم‌سازی مرحله‌ی ۱ روند ۲ ..... ۱۲۰
جدول ۴-۱۳ : مشخصات عضو بحرانی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مرحله‌ی ۱ روند ۲ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۰
جدول ۴-۱۴ : مشخصات اعضای مقاوم‌سازی شده مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در مرحله‌ی ۱ روند ۲ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۱
جدول ۴-۱۵ : مشخصات اعضای ایمن شده در برابر خرابی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ پس از روند ۲ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۱
جدول ۴-۱۶ : مشخصات عضو بحرانی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ قبل از مرحله‌ی ۱ روند ۳ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۲
جدول ۴-۱۷ : مشخصات اعضای مقاوم‌سازی شده مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مرحله‌ی ۱ روند ۳ ..... ۱۲۳
جدول ۴-۱۸ : مشخصات عضو بحرانی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مرحله‌ی ۱ روند ۳ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۴
جدول ۴-۱۹ : مشخصات اعضای مقاوم‌سازی شده مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در مرحله‌ی ۱ روند ۳ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۴
جدول ۴-۲۰ : مشخصات اعضای ایمن شده در برابر خرابی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ پس از روند ۳ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۵
جدول ۴-۲۱ : مشخصات عضو بحرانی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ قبل از مرحله‌ی ۱ روند ۴ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۶
جدول ۴-۲۲ : مشخصات اعضای مقاوم‌سازی شده مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مرحله‌ی ۱ روند ۴ ..... ۱۲۷
جدول ۴-۲۳ : مشخصات عضو بحرانی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در حین مرحله‌ی ۱ روند ۳ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۷
جدول ۴-۲۴ : مشخصات اعضای مقاوم‌سازی شده مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ در مرحله‌ی ۱ روند ۴ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۸

جدول ۴-۲۵ : مشخصات اعضای ایمن شده در برابر خرابی مدل $DLG_{20\times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ پس از روند ۴ مقاوم‌سازی ..... ۱۲۸
جدول ۴-۲۶ : مشخصات اعضای مدل $DLG_{21\times 21\text{-}7}$ قبل از مقاوم‌سازی ..... ۱۳۰
جدول ۴-۲۷ : مشخصات اعضای مدل $DLG_{21\times 21\text{-}7}$ پس از مقاوم‌سازی ..... ۱۳۱
جدول ۴-۲۸ : مشخصات اعضای مدل $DLG_{28\times 28\text{-}7}$ قبل از مقاوم‌سازی..... ۱۳۲
جدول ۴-۲۹ : مشخصات اعضای مدل $DLG_{28\times 28\text{-}7}$ پس از مقاوم‌سازی..... ۱۳۳
جدول ۴-۳۰ : مقایسه وزن مدل‌ها قبل و بعد از مقاوم‌سازی شده ..... ۱۳۳
جدول ۴-۳۱ : مشخصات میراگر بکار گرفته شده در سازه ..... ۱۳۷
جدول ۴-۳۲ : مشخصات تیپ‌بندی مقاطع بکار گرفته شده در سازه..... ۱۳۸

# فهرست اشکال

**فصل دوم : بررسی منابع و مروری بر مطالعات انجام یافته** ..... ۵

شکل ۲-۱ : نمایش شماتیک از وقوع خرابی پیشرونده ساختمان مسکونی رونان پونت ..... ۸
شکل ۲-۲ : تصاویر ساختمان مسکونی رونان پونت پس از وقوع خرابی پیشرونده ..... ۸
شکل ۲-۳ : تصاویر الف- ساختمان فدرال آمریکا در شهر اوکلاهاما و ب- برج خبیر در عربستان سعودی پس از وقوع خرابی پیشرونده ..... ۹
شکل ۲-۴ : تصاویر ساختمان ۲۲ طبقه پینو سوارز شهر مکزیک پس از وقوع خرابی پیشرونده ..... ۹
شکل ۲-۵ : تصاویر ساختمان‌های فولادی ساناما دیستریک پس از وقوع خرابی پیشرونده ..... ۱۰
شکل ۲-۶ : تصاویر بزرگراه هانشین تحت زلزله هانشین در کوبه پس از وقوع خرابی پیشرونده ..... ۱۰
شکل ۲-۷ : تصاویر سقف سالن ورزشی‌هارتفورد پس از وقوع خرابی پیشرونده ..... ۱۲
شکل ۲-۸ : تصاویر سقف تالار بخارست پس از وقوع خرابی پیشرونده ..... ۱۲
شکل ۲-۹ : خرابی پل خرپایی هانگری تحت اثر ضربه‌ی بازوی جرثقیل در سال ۱۹۸۸ ..... ۱۳
شکل ۲-۱۰ : سقف ترمینال فرودگاه 2E در سال ۲۰۰۴ ..... ۱۳
شکل ۲-۱۱ : نمودار مقایسه‌ی بین خرابی پیشرونده و کل خرابی‌ها در آمریکا و کانادا ..... ۱۴
شکل ۲-۱۲ : خرابی پیشرونده سازه در اثر زلزله ..... ۱۴
شکل ۲-۱۳ : خرابی پیشرونده گنبد مشبک در اثر انباشتگی بار برف در بالای گنبد ..... ۱۵
شکل ۲-۱۴ : خرابی پیشرونده سازه در اثر آتش‌سوزی در طبقات ..... ۱۵
شکل ۲-۱۵ : تعدادی از طرح‌های مقدماتی شبکه‌ها ..... ۲۳
شکل ۲-۱۶ : مثال‌هایی از شبکه‌های دولایه ..... ۲۵
شکل ۲-۱۷ : مثال‌هایی از شبکه‌ی مستقیم ..... ۲۵
شکل ۲-۱۸ : اثرات غیرخطی‌های هندسی و مصالح در سازه‌های فضاکار ..... ۲۶
شکل ۲-۱۹ : نمودار بار– تغییر مکان خرابی کلی یک سازه ..... ۳۱
شکل ۲-۲۰ : نمودار بار– تغییر مکان خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی یک سازه ..... ۳۱
شکل ۲-۲۱ : نمودار بار – تغییر مکان خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی یک سازه ..... ۳۱
شکل ۲-۲۲ : رابطه‌ی بار-تغییر مکان خطی‌سازی شده به روش قطعه به قطعه ..... ۳۳
شکل ۲-۲۳ : بار رامپی مورد استفاده در تحلیل دینامیکی فروجهش ..... ۴۰
شکل ۲-۲۴ : نمایش اشکال تحلیلی روش‌های مبتنی بر سختی ..... ۴۴
شکل ۲-۲۵ : الف- مدل شبکه دولایه با پیوندهای Bamford وب- ابزار کنترل نیرو و مشخصه بار-تغییر شکل آن ..... ۴۸
شکل ۲-۲۶ : پاسخ سازه دارای ابزار کنترل نیرو و بدون ابزار کنترل نیرو ..... ۴۸
شکل ۲-۲۷ : ابزار کنترل نیرو و رفتار عضو ..... ۴۹
شکل ۲-۲۸ : نتایج عملی و تئوریک مدل ..... ۴۹

**فصل سوم : مطالعه‌ی رفتار خرابی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار** ..... ۵۴

شکل ۳-۱ : نمای کلی از شبکه‌ی تخت دولایه‌ی مورد مطالعه در نرم‌افزار Formian ..... ۵۷
شکل ۳-۲ : ابعاد هندسی مدل‌های $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}30}$، $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45}$ و $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}60}$ ..... ۵۸
شکل ۳-۳ : شکل هندسی مدل $DLG_{21 \times 21\text{-}7\text{-}45}$ ..... ۵۹
شکل ۳-۴ : شکل هندسی مدل $DLG_{21 \times 21\text{-}7\text{-}45}$ ..... ۵۹
شکل ۳-۵ : شماره‌ی اعضای لایه‌ی بالایی مدل‌های $DLG_{20 \times 20\text{-}5}$ ..... ۶۰
شکل ۳-۶ : شماره‌ی اعضای لایه‌ی پایینی و میانی مدل‌های $DLG_{20 \times 20\text{-}5}$ ..... ۶۰
شکل ۳-۷ : نمودار تغییرات وزن کل سازه و لایه‌های بالایی، میانی و پایینی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45}$ ..... ۷۳
شکل ۳-۸ : نمودار تغییرات لاغری کل سازه و لایه‌های بالایی، میانی و پایینی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45}$ ..... ۷۳
شکل ۳-۹ : تغییرات حداکثر جابجایی گره‌ی میانی سازه مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45}$ طی هر ۷ نوع تیپ‌بندی ..... ۷۳
شکل ۳-۱۰ : تغییرات نسبت تنش اعضای کل سازه‌ی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45}$ ..... ۷۴
شکل ۳-۱۱ : تغییرات تعداد نوع مقاطع کل سازه و هر سه لایه‌ی بالایی، میانی و پایینی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45}$ ..... ۷۴
شکل ۳-۱۲ : رفتار تنش-کرنش اعضا در کشش ..... ۷۵
شکل ۳-۱۳ : عضو فشاری دو سر مفصل ..... ۷۵
شکل ۳-۱۴ : منحنی رفتار ماده‌ی فولاد نوع ۰۲ مدل‌سازی شده در نرم‌افزار OpenSees ..... ۷۶
شکل ۳-۱۵ : مقطع فیبر پچ دایره‌ای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار OpenSees ..... ۷۶
شکل ۳-۱۶ : نمودار رفتار بار-تغییرمکان محوری ۴ عضو از اعضای مدل‌های مورد مطالعه در فشار ..... ۷۸
شکل ۳-۱۷ : نمودار رفتار تنش-کرنش ۵ عضو از اعضای مدل‌های مورد مطالعه در فشار ..... ۷۸
شکل ۳-۱۸ : منحنی رفتار ماده‌ی چرخه‌ای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار OpenSees ..... ۷۹
شکل ۳-۱۹ : نمودار رفتار ایده آل تنش-کرنش اعضا ..... ۷۹
شکل ۳-۲۰ : الگوی بارگذاری سازه حین تحلیل‌های دینامیکی ..... ۸۱
شکل ۳-۲۱ : روند الگوریتم نیوتن ..... ۸۳
شکل ۳-۲۲ : رفتار بار-تغییرمکان مدل $DLG_{20X20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ ..... ۸۴
شکل ۳-۲۳ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ تحت D+0.25L ..... ۸۵
شکل ۳-۲۴ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ تحت D+0.5L ..... ۸۵
شکل ۳-۲۵ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ تحت D+L ..... ۸۶
شکل ۳-۲۶ : رفتار بار-تغییرمکان مدل $DLG_{20X20\text{-}5\text{-}45\text{-}2}$ ..... ۸۸
شکل ۳-۲۷ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}2}$ تحت D+0.25L ..... ۸۹
شکل ۳-۲۸ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}2}$ تحت D+0.5L ..... ۸۹
شکل ۳-۲۹ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}2}$ تحت D+L ..... ۹۰
شکل ۳-۳۰ : رفتار بار-تغییرمکان مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}3}$ ..... ۹۱
شکل ۳-۳۱ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}3}$ تحت D+0.25L ..... ۹۲
شکل ۳-۳۲ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}3}$ تحت D+0.5L ..... ۹۲

شکل ۳-۳۳ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}3}$ تحت D+L ..... ۹۳
شکل ۳-۳۴ : رفتار بار-تغییرمکان مدل $DLG_{20X20\text{-}5\text{-}45\text{-}4}$ ..... ۹۴
شکل ۳-۳۵ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}4}$ تحت D+0.25L ..... ۹۵
شکل ۳-۳۶ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}4}$ تحت D+0.5L..... ۹۵
شکل ۳-۳۷ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}4}$ تحت D+L ..... ۹۶
شکل ۳-۳۸ : رفتار بار-تغییرمکان مدل $DLG_{20X20\text{-}5\text{-}45\text{-}5}$ ..... ۹۷
شکل ۳-۳۹ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}5}$ تحت D+0.25L ..... ۹۸
شکل ۳-۴۰ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}5}$ تحت D+0.5L ..... ۹۸
شکل ۳-۴۱ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}5}$ تحت D+L ..... ۹۹
شکل ۳-۴۲ : رفتار بار-تغییرمکان مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$..... ۱۰۰
شکل ۳-۴۳ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ تحت D+0.25L ..... ۱۰۱
شکل ۳-۴۴ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ تحت D+0.5L ..... ۱۰۱
شکل ۳-۴۵ : نمودار تغییرمکان حذف عضو ۲ در تحلیل دینامیکی مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ تحت D+L ..... ۱۰۲
شکل ۳-۴۶ : رفتار خرابی سازه سالم مدل‌های $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ تا $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ ..... ۱۰۴
شکل ۳-۴۷ : رفتار خرابی سازه مدل‌های $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}1}$ تا $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}6}$ ناشی از گسیختگی عضو بحرانی هر مدل ..... ۱۰۵
شکل ۳-۴۸ : نمودار تغییرات ضریب افزایش دینامیکی..... ۱۰۵

**فصل چهارم : مقاوم‌سازی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار.....۱۱۰**

شکل ۴-۱ : روند تغییرات وزن مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ طی مقاوم‌سازی روند ۱ ..... ۱۱۸
شکل ۴-۲ : روند تغییرات وزن مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ طی مقاوم‌سازی روند ۲ ..... ۱۲۲
شکل ۴-۳ : روند تغییرات وزن مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ طی مقاوم‌سازی روند ۳ ..... ۱۲۵
شکل ۴-۴ : روند تغییرات وزن مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ طی مقاوم‌سازی روند ۴ ..... ۱۲۹
شکل ۴-۵ : روند تغییرات وزن مدل $DLG_{20 \times 20\text{-}5\text{-}45\text{-}7}$ طی مقاوم‌سازی روند ۱، ۲، ۳ و۴ ..... ۱۲۹
شکل ۴-۶ : میراگر بکار گرفته شده CSSD ..... ۱۳۵
شکل ۴-۷ : منحنی بار-جابجایی مدل با و بدون تکیه گاه .....۱۳۶
شکل ۴-۸ : منحنی بار-جابجایی مدل‌سازی شده .....۱۳۶
شکل ۴-۹ : رفتار بار-تغییر مکان گره وسط لایه‌ی پایینی شبکه در حضور و عدم حضور میراگر ..... ۱۳۹
شکل ۴-۱۰ : رفتار بار-تغییر مکان گره وسط لایه‌ی پایینی شبکه حین مدل‌سازی نادرست میراگر بر روی شبکه ..... ۱۳۹
شکل ۴-۱۱ : رفتار بار-تغییر مکان گره وسط لایه‌ی پایینی شبکه در اثر حذف هر یک از اعضای بحرانی شبکه ..... ۱۴۰
شکل ۴-۱۲ : رفتار بار-تغییر مکان گره وسط لایه‌ی پایینی شبکه در اثر حذف عضو بحرانی لایه‌ی جان شبکه ..... ۱۴۱
شکل ۴-۱۳ : رفتار بار-تغییر مکان گره وسط لایه‌ی پایینی شبکه در حضور و عدم حضور میراگر در سازه ..... ۱۴۲

## چکیده

شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار سازه‌هایی با سختی بالا و وزن کم می‌باشند که در چند دهه‌ی اخیر به نحو گسترده‌ای برای پوشش فضاهای وسیع بدون استفاده از ستونهای داخلی به کار گرفته شده‌اند. این نوع از سیستم‌های فضایی با وجود داشتن درجهٔ نامعینی استاتیکی بالا دارای رفتار خرابی تردند، به طوریکه خرابی یک عضو و یا بخشی از سازه می‌تواند به سرعت در کل سازه منتشر شده و باعث بروز خرابی پیشرونده در سازه گردد. گزارشهای موجود از خرابی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار نیز رفتار خرابی ترد این سازه‌ها و آسیب‌پذیری آنها در برابر پدیده‌ی خرابی پیشرونده را تایید می‌کند. خرابی پیشرونده پدیده‌ای است که در آن خرابی از یک قسمت سازه به صورت موضعی شروع شده و در نهایت به خرابی کل سازه منجر می‌شود. زمانی که در یک نقطه از سازه خرابی موضعی اتفاق می افتد چنانچه سازه طوری طراحی شده باشد که خرابی موضعی نتواند به سایر اعضا سرایت کند، خرابی به صورت موضعی باقی خواهد ماند و موجب خرابی کل سازه نخواهد شد، در غیر اینصورت خرابی به سایر قسمت‌های سازه سرایت کرده و موجب بروز پدیدهٔ خرابی پیشرونده در سازه خواهد شد. در این تحقیق به ارائه روندهای مختلف مقاوم‌سازی، معرفی مطلوب‌ترین روند مقاوم‌سازی و نیز به بررسی رفتار خرابی شبکه‌های تخت دولایهٔ فضاکاری که قابلیت اجرا در عمل و واقعیت را دارند، پرداخته شده‌است. با انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی خرابی بر روی مدل‌های مورد مطالعه، به بررسی تاثیر تیپ‌بندی مقاطع روی رفتار خرابی شبکه‌های تخت دولایهٔ فضاکار پرداخته شده‌است. همچنین در ادامه، روندهای مختلف مقاوم‌سازی شبکه‌های تخت دولایهٔ فضاکار مورد مطالعه قرارگرفته‌اند و با انتخاب بهترین روند مقاوم‌سازی، تاثیر پارامترهای طول دهانه و ابعاد چشمه بر روند مقاوم‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته‌است.در پایان نشان داده شده‌است، اگرچه مقاوم‌سازی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار موجب افزایش وزن سازه و بموجب آن افزایش هزینه‌ها می‌شود، اما با در نظر گرفتن تدابیر خاصی همچون چون کاهش ابعاد چشمه‌ها می‌توان این افزایش وزن را تقلیل داد، در عین حال سازه‌ای مقاوم در برابر خرابی پیشرونده داشت.



**کلمات کلیدی:** شبکه‌ی تخت دولایه‌ی فضاکار، خرابی پیشرونده، تحلیل دینامیکی، تحلیل استاتیکی، مقاوم‌سازی.

# فصل اول

## مقدمه

# فصل اول

## مقدمه

سازه‌ی فضاکار، یک سیستم سازه‌ای متشکل از اعضای مستقیم است که در آن انتقال بارها به صورت سه‌بعدی انجام می‌گیرد. شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار[۱]، سیستم‌های خاصی متشکل از دو شبکه‌ی موازی بالایی و پایینی هستند که اتصال این دو شبکه توسط اعضای مورب یا قائم جان انجام می‌گیرد[۱۲]. این نوع سازه‌ها به خاطر مزایایی چون سختی بالا، وزن کم، نصب آسان و قابلیت پوشش دادن فضاهای وسیع در چند دهه‌ی اخیر به نحو گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مزایا باعث بوجود آمدن رقابتهای زیادی در زمینه‌ی طراحی اقتصادی آنها شده‌است[۱۳]. بارگذاری این سازه ها غالباً به صورت نیروهای عمود بر پلان سازه انجام می‌شود. همچنین با توجه به رفتار خرپایی این سازه‌ها، اعضای سازه تحت نیروهای غالب محوری قرار می‌گیرند.

در این سیستم‌ها نیز مانند سایر سازه‌ها باید ضوابط مربوط به پایداری کل سازه و اعضای تشکیل‌دهنده‌ی آن به درستی مورد بررسی قرار گیرد. این خرپاهای فضایی معمولاً از درجه‌ی نامعینی استاتیکی بالایی برخوردار بوده و بر همین اساس تصور می‌شود که پس از خرابی عضو یا بخشی از سازه، سایر قسمتهای آن بتوانند نیروهای بازتوزیع شده را به راحتی جذب کرده و حتی بار بیشتری را نیز تحمل نمایند. اما برخی شواهد تجربی صحت این ادعا را مورد تردید قرار می‌دهد[۱۴]. بر طبق این تحقیقات در برخی موارد حتی خرابی یک عضو سازه می‌تواند خرابی متوالی اعضای دیگر سازه را به طور ناگهانی در پی داشته و نهایتاً منجر به خرابی کل سازه شود. در این سازه‌ها به دلایلی مانند کمانش یک عضو فشاری، تسلیم یک عضو کششی،

[۱] Double Layer Grids ( DLGS )

ناپایداری گرهی، اتصال نامناسب اعضا و وجود ناکاملی‌های هندسی، خرابی موضعی در سازه می تواند پدید آید. اگر نحوه طراحی سازه به گونه ای باشد که سازه قدرت جذب این خرابی موضعی را داشته باشد، خرابی به صورت موضعی در سازه باقی مانده و به سایر قسمتها سرایت نخواهد کرد، در غیر اینصورت خرابی به سایر قسمتهای سازه منتشر شده و در نهایت منجر به خرابی کل سازه خواهد شد. در حقیقت در این حالت یک مکانیسم زنجیری خرابی به وقوع می‌پیوندد که تحت عنوان پدیده‌ی خرابی پیشرونده[۱] یا اثر دومینو[۲] مشهور است.

واضح است که رفتار خرابی مناسب شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار و یا به بیان دیگر شکل‌پذیری این سازه‌ها سبب جذب نیروهای بازتوزیع شدهٔ ناشی از خرابی‌های موضعی، بوسیله‌ی سایر اعضای سازه شده و بنابراین باعث می شود خرابی‌ها به صورت موضعی در سازه باقی مانده و از انتشار آنها و بروز خرابی پیشرونده جلوگیری می‌کند.

اگر در اثر کمانش یا عوامل دیگری که سبب ایجاد خرابی موضعی در سازه می شوند ظرفیت باربری عضو یا مجموعه ای از اعضای سازه‌ی شبکه‌ی دولایه‌ی فضاکار به طور ناگهانی دچار کاهش شدیدی شود، پخش بار ناشی از این خرابی موضعی ممکن است به قدری سریع و ناگهانی باشد که در طی فرایند توزیع بار، سایر اعضای سازه نتوانند بار باز توزیع شده را با سرعت کافی جذب نمایند و از این رو بلافاصله پس از ایجاد خرابی موضعی در سازه یک ناپایداری موقتی در مسیر تعادل سازه پدید می‌آید. سازه در جستجوی یک حالت تعادل پایدار به طور ناگهانی به وضعیت تعادل جدیدی در همین تراز بار انتقال می‌یابد، انتقال به این وضعیت تعادل جدید مستلزم تغییرات بزرگ و ناگهانی در تغییر شکل سازه بوده و با اثرات دینامیکی شدیدی همراه است. این پدیده به پدیده‌ی فروجهش دینامیکی[۳] موسوم است[۱]. اثرات دینامیکی ناشی از فروجهش خود سبب اعمال نیروهای اضافی بر سازه شده و به این ترتیب باعث افزایش بازتوزیع نیروهای ناشی از خرابی موضعی شده و خطر انتشار خرابی را تشدید می‌کند. در چنین مواردی برای ارزیابی صحیح رفتار خرابی سازه، تحلیل استاتیکی کافی نبوده و باید با انجام یک تحلیل دینامیکی مناسب، اثرات دینامیکی ناشی از فروجهش به درستی در تحلیل در نظرگرفته شوند.

برای بررسی رفتار خرابی شبکه های دولایه‌ی فضاکار دو روش اساسی مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از: روش استاتیکی و روش دینامیکی. در روش استاتیکی برای تحلیل واکنش خرابی سازه، از اثرات دینامیکی خرابی موضعی صرف‌نظر می‌شود. در روش دینامیکی، طبیعت دینامیکی پدیده مستقیماً در تحلیل در نظر گرفته می‌شود. در بیشتر مطالعاتی که در مورد پدیده‌ی خرابی پیشرونده در سازه‌های فضاکار صورت گرفته است از روش استاتیکی برای تحلیل خرابی استفاده شده‌است اما از میان روش‌های معرفی شده، روش دینامیکی غیرخطی منجر به پاسخ‌های دقیق‌تری می‌شود[۲۰-۱۵]. اخیراً مطالعاتی در مورد اثرات دینامیکی ناشی از فروجهش در گنبدهای مشبک تک‌لایه انجام شده‌است[۱۵]. مطالعات جامعی در رابطه با پدیده‌ی

[۱] Progressive Collapse
[۲] Domino Effect
[۳] Dynamic Snap Through Phenomenon

خرابی پیشرونده در شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار به روش دینامیکی توسط م.شیدایی[۲] انجام شده است که در آن تحلیل های استاتیکی و دینامیکی بر روی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار انجام گرفته و نتایج تحلیلهای استاتیکی و دینامیکی با هم مقایسه شده‌اند و اهمیت تحلیل دینامیکی در ارزیابی صحیح رفتار خرابی این سازه ها نشان داده شده‌است. در این میان می‌توان از مدل‌های تقریبی نیز استفاده نمود. در حقیقت، روش‌های تقریبی، محدوده‌ی پاسخ سازه را با دقت مناسبی تخمین می‌زنند. اگر پاسخ با اختلاف مناسبی کمتر از معیارهای مجاز آئین‌نامه بود، می‌توان از انجام روش‌های دقیق‌تر اجتناب نمود[۲۵-۲۲].

در طراحی شبکه های دو لایه‌ی فضا کار باید توجه خاصی به مساله‌ی خرابی و پایداری سازه معطوف شود و با توجه به طبیعت ترد رفتار خرابی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار، بایستی عواملی که باعث افزایش شکل‌پذیری[۱] در این سازه‌ها می‌شوند، شناسایی شوند[۳]. بر این اساس در این پایان نامه به بررسی رفتار انواع شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار با تیپ‌بندی های مختلف برای اعضا، در برابر وقوع خرابی پیشرونده پرداخته شده‌است.

در فصل دوم به بررسی منابع موجود پرداخته شده‌است. در این فصل ابتدا پدیده‌ی خرابی پیشرونده و عوامل بوجود آورنده‌ی آن معرفی شده‌اند. پس از آن به معرفی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار پرداخته شده و مشخصات رفتاری شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار و رفتار خرابی آنها مورد بررسی قرار گرفته‌است. در ادامه پس از تشریح نحوه‌ی انجام تحلیل کمانش رفتار اعضا، روش‌های تحلیل استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌است و در نهایت یکی از روش‌های مقاوم‌سازی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار در برابر خرابی پیشرونده معرفی شده‌است.

در فصل سوم پس از تحلیل و طراحی تیپ‌بندی‌های مختلف شبکه‌ی تخت دولایه‌ی فضاکار و همچنین تعیین رفتار اعضای فشاری، رفتار خرابی تیپ‌بندی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نوع رفتار خرابی آنها تعیین شده‌است. در ادامه‌ی کار به بررسی روندهای مختلف مقاوم‌سازی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار پرداخته شده‌است و در نهایت با مقایسه‌ی نتایج مقاوم‌سازی شبکه‌ها، بهترین روند مقاوم‌سازی معرفی شده‌است. در پایان نیز به تحلیل و بررسی شبکه‌ی تخت دولایه‌ی فضاکار مقاوم‌سازی شده با میراگر شکاف‌دار لوله‌ای فولادی پرداخته شده‌است. لازم به تذکر است که تحلیل‌های این پایان‌نامه با استفاده از نرم‌افزار OpenSees[۲][۲۶] و مدل‌سازی و طراحی شبکه‌ی تخت دولایه‌ی فضاکار با استفاده از نرم‌افزار Formian و SAP2000 انجام شده‌است.

[۱] Ductility
[۲] Open System for Earthquake Engineering Simulation

# فصل دوم

## بررسی منابع و مروری بر مطالعات انجام یافته

# فصل دوم

# بررسی منابع و مروری بر مطالعات انجام یافته

## ۲–۱ مقدمه

شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار سازه‌هایی هستند که امروزه به صورت گسترده‌ای برای پوشش دهانه‌های وسیع مانند ساختمانهای صنعتی، سالن‌های ورزشی، اجتماعات و نمایش در سرتاسر دنیا بکار می‌روند. با توجه به حوادث رخ داده ناشی از خرابی پیشرونده، به بررسی عوامل بوجود آورنده‌ی خرابی پیشرونده پرداخته شده‌است تا بتوان با حذف عوامل مخرب و رفع نواقص سازه‌ای، احتمال وقوع خرابی پیشرونده در سازه‌ها را کاهش داد. مطالعاتی که اخیراً بر روی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار انجام گرفته است نشانگر این بوده‌است که این سازه‌ها نسبت به پدیده‌ی خرابی پیشرونده حساسیت زیادی نشان می‌دهند. در این سازه‌ها خرابی موضعی در بخشی از سازه می‌تواند به سرعت به سایر قسمت‌های سازه سرایت کرده و موجب خرابی کل سازه شود. در مطالعه‌ی رفتار خرابی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار نیازمند بررسی مشخصات رفتاری شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار هستیم و تا شناخت خوبی از مشخصات رفتاری آنها نداشته باشیم، نمی‌توانیم در مورد رفتار خرابی آنها قضاوت درستی داشته باشیم. به طور کلی رفتار خرابی سیستم‌های شبکه‌ی دولایه‌ی فضاکار تابعی از رفتار پس بحرانی اعضای آن می‌باشد. در این فصل پس از معرفی پدیده‌ی خرابی پیشرونده و شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار به بررسی مشخصات رفتاری، رفتار خرابی، تحلیل استاتیکی و دینامیکی خرابی پیشرونده‌ی شبکه‌های تخت دولایه‌ی فضاکار پرداخته شده‌است. در پایان روشهای مقاوم‌سازی شبکه‌های دولایه‌ی فضاکار در برابر خرابی پیشرونده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند.