

## چکیده

با توجه به گسترش روزافزون ساخت ساختمان‌های بزرگ با دهانه‌های وسیع مانند استادیوم‌ها، نمایشگاه‌ها، سالن‌های اجتماعات، مصلاها و آشیانه‌های هواپیما، مطالعه در زمینه تحلیل، طراحی و بهینه‌یابی شبکه‌های دولایه‌ای، که برای پوشش سقف این گونه سازه‌ها به کار می‌رود، امری ضروری است. در طراحی بهینه سازه‌های پرعضو که با تغییر توپولوژی و مشخصات هندسی آنها سازه‌های متنوعی ایجاد می‌شود، به‌کارگیری روش‌های تقریبی موجب صرفه‌جویی در زمان محاسبات می‌گردد.

موضوع این پایان‌نامه مطالعه پارامتریک شبکه‌های دولایه‌ای برای تحلیل و طراحی بهینه سازه و نیز استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تحلیل و طراحی تقریبی شبکه‌های دولایه‌ای است.

در این رساله، ضمن بررسی ادبیات مربوط به رفتار شبکه‌های دولایه‌ای و جنبه‌های مختلف تحلیل و طراحی این سازه‌ها، چهار نوع تاشه از این سازه شامل مربع روی مربع، مربع روی مورب، مورب روی مربع و مورب روی مورب با متغیرهایی مانند تعداد چشمه، نوع تکیه‌گاه و اندازه ارتفاع تحت اثر بارهای قائم از نظر وزن و خیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته و مناسب‌ترین آنها از نظر توپولوژی برای آموزش شبکه‌های عصبی انتخاب شده است. در این پایان‌نامه ضمن بررسی پیشینه تحقیقاتی در زمینه کاربرد شبکه‌های عصبی در تحلیل و طراحی سازه‌ها، دو نوع شبکه عصبی با الگوریتم‌های پس‌انتشار خطا و پایه شعاعی برای تحلیل و طراحی و پیش‌بینی وزن و خیز شبکه‌های دولایه‌ای به کار گرفته شده و کارایی آنها با توجه به دو عامل سرعت و دقت مقایسه شده است.

مطالعات پارامتریک انجام شده نشان می‌دهد که با توجه به شرایط و قیود در نظر گرفته شده، تاشه مربع روی مربع از نظر تعداد عضو و گره از سایر تاشه‌ها اقتصادی‌تر و از نظر وزن و خیز غالباً مناسب‌تر است، به‌ویژه وقتی که سازه بر روی تکیه‌گاه گوشه‌ای یا گوشه‌ای درختی قرار گرفته باشد. تکیه‌گاه گوشه‌ای موجب توزیع غیریکنواخت نیروها و در نتیجه افزایش وزن سازه می‌شود. لذا چنانچه در صورت

نیاز به دهانه‌های بزرگ، استفاده از تکیه‌گاه گوشه‌ای اجتناب‌ناپذیر باشد، بهتر است از تکیه‌گاه گوشه‌ای درختی استفاده شود.

مطالعات مربوط به شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان می‌دهد که شبکه‌های پسانتشار و پایه شعاعی در تحلیل و طراحی تقریبی سازه‌ها و نیز پیش‌بینی وزن و خیز آنها قابلیت بالایی دارند. هر چند شبکه پسانتشار در عمل دقت بیشتری را نشان می‌دهد، لیکن شبکه پایه شعاعی، که در این رساله برای اولین بار در زمینه تحلیل و طراحی سازه‌ها به کار گرفته شده است، از سرعت بیشتری برخوردار است.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: سازه‌های فضاکار
۱	۱.۱ مقدمه
۱	۲.۱ تاریخچه
۳	۳.۱ انواع سازه‌های فضاکار
۵	۴.۱ مزایا و معایب سازه‌های فضاکار
۷	۵.۱ شبکه‌های دولایه‌ای
۱۰	۶.۱ شبکه‌های خرابایی
۱۲	۷.۱ شبکه‌های فضایی دوسویه
۱۵	۸.۱ شبکه‌های فضایی با بازشوهای داخلی
۱۶	۹.۱ اهداف و ساختار پایان‌نامه
۱۷	فصل دوم: رفتار کلی شبکه‌های دولایه‌ای
۱۷	۱.۲ مقدمه
۱۸	۲.۲ نامعینی استاتیکی و خرابی پیشرونده
۱۹	۳.۲ مودهای خرابی
۲۱	۴.۲ رفتار اعضای کششی و فشاری
۲۲	۵.۲ طول عضو مؤثر
۲۳	۶.۲ رفتار اتصالات و پیوندها
۲۵	۷.۲ رفتار کلی شبکه‌های دولایه‌ای
۲۷	۸.۲ نتایج آزمایش‌های تجربی

صفحه	عنوان
۳۲	۹.۲ مشخصات کلی رفتار شبکه‌های دولایه‌ای
۳۴	۱۰.۲ اصلاح رفتار شبکه‌های دولایه‌ای
۳۵	۱.۱۰.۲ بهبود شکل‌پذیری
۳۷	۲.۱۰.۲ بهبود توزیع نیرو
۴۱	۳.۱۰.۲ روش‌های تلفیقی
۴۳	فصل سوم: روش‌های تحلیل شبکه‌های دولایه‌ای
۴۳	۱.۳ مقدمه
۴۴	۲.۳ بارگذاری
۴۹	۳.۳ تحلیل استاتیکی
۵۰	۴.۳ روش‌های تحلیل تقریبی
۵۰	۱.۴.۳ روش تقریبی مبتنی بر محیط‌های پیوسته مشابه
۵۱	۲.۴.۳ روش مبتنی بر تفاوت‌های محدود
۵۱	۳.۴.۳ روش مبتنی بر اجزای محدود
۵۲	۵.۳ تحلیل خطی
۵۲	۶.۳ بررسی رفتار عضو
۵۳	۷.۳ تحلیل ناپایداری
۵۴	۸.۳ تحلیل غیرخطی
۵۵	۹.۳ تحلیل دینامیکی
۵۸	۱۰.۳ تحلیل خرابی پیشرونده
۶۰	۱۱.۳ تحلیل آتش‌سوزی
۶۳	۱۲.۳ تحلیل حرکت لرزه‌ای

صفحه	عنوان
۶۹	فصل چهارم: طراحی شبکه‌های دولایه‌ای
۶۹	۱.۴ مقدمه
۷۰	۲.۴ ملاحظات طراحی
۷۳	۳.۴ بررسی عوامل موثر در طراحی بهینه
۷۶	۴.۴ مشخصات سازه‌های مورد بررسی
۷۷	۵.۴ تاشه پردازی، تحلیل، طراحی و بهینه‌یابی
۷۹	۶.۴ توزیع نیرو در شبکه‌های دولایه‌ای
۸۰	۷.۴ بررسی نتایج به دست آمده
۹۳	فصل پنجم: نگرش کلی به شبکه‌های عصبی
۹۳	۱.۵ مقدمه
۹۳	۲.۵ تاریخچه شبکه‌های عصبی
۹۶	۳.۵ فرایندهای یادگیری در شبکه‌های عصبی
۹۷	۴.۵ قواعد یادگیری
۹۹	۵.۵ ساختار شبکه‌های عصبی
۱۰۰	۶.۵ الگوریتم یادگیری پرسپترون
۱۰۲	۷.۵ روش پس انتشار خطا
۱۰۵	۸.۵ الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا
۱۱۰	۹.۵ شیوه‌های بهبود عملکرد الگوریتم پس انتشار
۱۱۱	۱.۹.۵ وزن‌های اولیه
۱۱۲	۲.۹.۵ ضریب یادگیری
۱۱۵	۳.۹.۵ ممتنم
۱۱۷	۱۰.۵ روش پایه شعاعی
۱۱۸	۱۱.۵ تئوری کاور درباره جدا پذیری الگوها
۱۲۱	۱۲.۵ مسئله درونیابی

صفحه	عنوان
۱۲۴	۱۳.۵ مسئله بازسازی ابرسطح بدهنچار
۱۲۶	۱۴.۵ نظریه تنظیم کنندگی
۱۲۹	۱۵.۵ مقایسه شبکه پایه شعاعی و شبکه پس انتشار
۱۳۰	۱۶.۵ شیوه‌های یادگیری در شبکه پایه شعاعی
۱۳۱	۱.۱۶.۵ انتخاب مراکز ثابت به صورت اتفاقی
۱۳۳	۲.۱۶.۵ انتخاب مراکز به صورت خودسازمانده
۱۳۳	۳.۱۶.۵ انتخاب مراکز و تنظیم وزن‌ها به صورت تحت نظارت
۱۳۶	فصل ششم: کاربرد شبکه‌های عصبی در تحلیل و طراحی سازه‌ها
۱۳۶	۱.۶ مقدمه
۱۳۷	۲.۶ آماده سازی داده‌های ورودی برای آموزش شبکه‌های عصبی
۱۳۹	۳.۶ نرم افزارهای مورد استفاده
۱۴۰	۴.۶ شبکه‌های عصبی به کار گرفته شده
۱۴۲	۵.۶ پیش بینی وزن سازه
۱۴۲	۱.۵.۶ به کارگیری الگوریتم پس انتشار با استفاده از نرم افزار NW
۱۴۵	۲.۵.۶ به کارگیری الگوریتم‌های پس انتشار و پایه شعاعی با استفاده از نرم افزار Matlab
۱۵۰	۶.۶ پیش بینی خیز سازه
۱۵۰	۱.۶.۶ به کارگیری الگوریتم پس انتشار با استفاده از نرم افزار NW
۱۵۳	۲.۶.۶ به کارگیری الگوریتم‌های پس انتشار و پایه شعاعی با استفاده از نرم افزار Matlab
۱۵۶	۳.۶.۶ بررسی نتایج به دست آمده
۱۵۸	۷.۶ تحلیل سازه یا پیش بینی نیروهای اعضا
۱۵۹	۱.۷.۶ آموزش شبکه پس انتشار برای تحلیل سازه
۱۶۳	۲.۷.۶ آموزش شبکه پایه شعاعی برای تحلیل سازه
۱۶۷	۸.۶ طراحی سازه یا پیش بینی سطح مقطع اعضا
۱۶۸	۱.۸.۶ آموزش شبکه پس انتشار برای طراحی سازه

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۷۲	۲.۸.۶ آموزش شبکه پایه شعاعی برای طراحی سازه
۱۷۶	۹.۶ نتایج بررسی‌های مربوط به تحلیل و طراحی
۱۷۷	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد برای کارهای آتی
۱۷۷	۱.۷ مقدمه
۱۷۷	۲.۷ نتایج مربوط به بررسی شبکه‌های دولایه‌ای
۱۷۸	۳.۷ نتایج مربوط به کاربرد شبکه‌های عصبی
۱۷۹	۴.۷ پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده
۱۸۱	مراجع

## فهرست جداول

شماره جدول	عنوان	صفحه
جدول ۴-۱	اندازه و ضلع واحدهای هرمی و ارتفاع شبکه	۷۲
جدول ۴-۲	مقایسه بیشینه نیروی محوری و وزن واحد سطح در تاشه‌های مختلف شبکه‌های دولایه‌ای	۸۰
جدول ۴-۳	مقایسه تاشه‌های چهارگانه از نظر تعداد گره و تعداد عضو	۸۱
جدول ۶-۱	مشخصات شبکه پسانتشار با ساختارهای گوناگون برای پیش‌بینی وزن سازه با استفاده از نرم‌افزار NW	۱۴۴
جدول ۶-۲	مقایسه وزن سازه به دست آمده از محاسبه و پاسخ شبکه پسانتشار از نرم‌افزار NW	۱۴۵
جدول ۶-۳	مقایسه وزن سازه به دست آمده از محاسبه و جواب‌های شبکه‌های پایه شعاعی و پسانتشار با استفاده از نرم‌افزار Matlab	۱۴۹
جدول ۶-۴	مشخصات شبکه پسانتشار با ساختارهای گوناگون برای پیش‌بینی خیز سازه با استفاده از نرم‌افزار NW	۱۵۱
جدول ۶-۵	مقایسه خیز بیشینه سازه به دست آمده از تحلیل سازه و پاسخ شبکه پسانتشار از نرم‌افزار NW	۱۵۲
جدول ۶-۶	مقایسه خیز بیشینه سازه به دست آمده از تحلیل سازه و جواب‌های شبکه پایه شعاعی و پسانتشار با استفاده از نرم‌افزار Matlab	۱۵۶
جدول ۶-۷	مقایسه زمان عملیات و دقت شبکه‌های پسانتشار و پایه شعاعی	۱۵۷
جدول ۶-۸	مقایسه نیروهای به دست آمده از شبکه‌های پایه شعاعی و پسانتشار با جواب‌های محاسباتی برای تعدادی از اعضای الگوهای شماره ۵ و ۱۰	۱۶۶
جدول ۶-۹	فهرست سطوح مقطع اعضا استفاده شده در طراحی سازه	۱۶۷
جدول ۶-۱۰	مقایسه سطح مقطع به دست آمده از طراحی سازه و شبکه‌های پایه شعاعی و پسانتشار برای تعدادی از اعضای الگوهای شماره ۵ و ۱۰	۱۷۵



## فهرست شکل‌ها

شماره شکل	عنوان	صفحه
شکل ۱-۱	نمونه‌ای از سازه‌های فضاکار	۴
شکل ۲-۱	انواع شبکه‌های دولایه‌ای	۹
شکل ۳-۱	آرایش‌های مختلف شبکه مربعی	۱۲
شکل ۴-۱	شبکه‌های مربعی اصلاح شده	۱۳
شکل ۱-۲	رفتار کلی شبکه‌های دولایه‌ای	۲۶
شکل ۲-۲	کمانش اعضای فشاری در شبکه‌ها با تکیه‌گاه گوشه‌ای	۲۷
شکل ۳-۲	مقایسه نتایج تجربی با نتایج نظری در مورد ظرفیت شبکه‌های دولایه‌ای	۲۸
شکل ۴-۲	پیش‌تندگی در یک شبکه دولایه‌ای ۳×۳	۴۰
شکل ۵-۲	مقایسه نتایج تجربی خرابی مرو	۴۲
شکل ۱-۳	نمای کلی شبکه‌های فضایی متکی بر تکیه‌گاه‌های نرم	۶۵
شکل ۲-۳	ترتیبات کلی اتصالات شبکه به زیر سازه به منظور مقاومت در برابر بارهای افقی	۶۸
شکل ۱-۴	تاشه‌های شبکه‌های دولایه‌ای	۷۴
شکل ۲-۴	انواع تکیه‌گاه‌های انتخاب شده	۷۷
شکل ۱-۵	ساختار یک سلول عصبی بیولوژیک	۹۴
شکل ۲-۵	ساختار شبکه عصبی مصنوعی	۹۹
شکل ۳-۵	مدل پرسپترون تک لایه	۱۰۱
شکل ۴-۵	شبکه عصبی پیشخور دولایه‌ای	۱۰۴
شکل ۵-۵	مثال برای جداسازی ۵ نقطه	۱۲۰
شکل ۶-۵	نمایش نگاشت ورودی به خروجی از دامنه X به محدوده Y	۱۲۵

## فهرست نمودارها

شماره نمودار	عنوان	صفحه
نمودار ۱-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تاشه برای تکیه‌گاه نوع ۱	۸۴
نمودار ۲-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تاشه برای تکیه‌گاه نوع ۲	۸۴
نمودار ۳-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تاشه برای تکیه‌گاه نوع ۳	۸۵
نمودار ۴-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تاشه برای تکیه‌گاه نوع ۴	۸۵
نمودار ۴-۵	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تاشه برای تکیه‌گاه نوع ۵	۸۶
نمودار ۶-۴	تغییرات خیز شبکه دولایه‌ای ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تاشه برای تکیه‌گاه نوع ۱	۸۶
نمودار ۷-۴	تغییرات خیز شبکه دولایه‌ای ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تاشه برای تکیه‌گاه نوع ۳	۸۷
نمودار ۸-۴	تغییرات خیز شبکه دولایه‌ای ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تاشه برای تکیه‌گاه نوع ۵	۸۷
نمودار ۹-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای تاشه مربع روی مربع برحسب ارتفاع و تعداد چشمه برای تکیه‌گاه نوع ۱	۸۸
نمودار ۱۰-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای تاشه مربع روی مربع برحسب ارتفاع و تعداد چشمه برای تکیه‌گاه نوع ۳	۸۸
نمودار ۱۱-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای تاشه مربع روی مربع برحسب ارتفاع و تعداد چشمه برای تکیه‌گاه نوع ۵	۸۹
نمودار ۱۲-۴	تغییرات خیز شبکه‌های دولایه‌ای مربع روی مربع برحسب ارتفاع و تعداد چشمه برای تکیه‌گاه نوع ۱	۸۹
نمودار ۱۳-۴	تغییرات وزن شبکه‌های دولایه‌ای مربع روی مربع ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تکیه‌گاه	۹۰
نمودار ۱۴-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای مربع روی مورب ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تکیه‌گاه	۹۰
نمودار ۱۵-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای مورب روی مربع ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تکیه‌گاه	۹۱
نمودار ۱۶-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای مورب روی مورب ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تکیه‌گاه	۹۱
نمودار ۱۷-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای مربع روی مربع ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تکیه‌گاه	۹۲
نمودار ۱۸-۴	تغییرات وزن شبکه دولایه‌ای مربع روی مورب ۱۱ چشمه‌ای برحسب ارتفاع و نوع تکیه‌گاه	۹۲

## ادامه فهرست نمودارها

شماره نمودار	عنوان	صفحه
نمودار ۱-۶	همبستگی بین پاسخ‌های به‌دست آمده از آموزش شبکه پس‌انتشار و جواب‌های محاسباتی برای پیش‌بینی وزن سازه	۱۴۸
نمودار ۲-۶	همبستگی بین پاسخ‌های به‌دست آمده از آموزش شبکه پایه شعاعی و جواب‌های محاسباتی برای پیش‌بینی وزن سازه	۱۴۸
نمودار ۳-۶	همبستگی بین پاسخ‌های به‌دست آمده از آموزش شبکه پس‌انتشار و جواب‌های محاسباتی برای پیش‌بینی حداکثر خیز سازه	۱۵۴
نمودار ۴-۶	همبستگی بین پاسخ‌های به‌دست آمده از آموزش شبکه پایه شعاعی و جواب‌های محاسباتی برای پیش‌بینی حداکثر خیز سازه	۱۵۵
نمودار ۵-۶	همبستگی بین پاسخ‌های به‌دست آمده از شبکه پس‌انتشار با پاسخ‌های حاصل از تحلیل سازه برای الگوی شماره ۵	۱۶۱
نمودار ۶-۶	همبستگی بین پاسخ‌های به‌دست آمده از شبکه پس‌انتشار با پاسخ‌های حاصل از تحلیل سازه برای الگوی شماره ۱۰	۱۶۲
نمودار ۷-۶	مقایسه نیروهای عضوی به‌دست آمده از شبکه پس‌انتشار و جواب‌های محاسباتی برای الگوی شماره ۵	۱۶۲
نمودار ۸-۶	همبستگی بین پاسخ‌های به‌دست آمده از شبکه پایه شعاعی با پاسخ‌های حاصل از تحلیل سازه برای الگوی شماره ۵	۱۶۴
نمودار ۹-۶	همبستگی بین پاسخ‌های به‌دست آمده از شبکه پایه شعاعی با پاسخ‌های حاصل از تحلیل سازه برای الگوی شماره ۱۰	۱۶۴
نمودار ۱۰-۶	مقایسه نیروهای عضوی به‌دست آمده از شبکه پایه شعاعی و جواب‌های محاسباتی برای الگوی آزمایشی شماره ۵	۱۶۵
نمودار ۱۱-۶	همبستگی پاسخ‌های به‌دست آمده از شبکه پس‌انتشار با پاسخ‌های حاصل از طراحی سازه برای الگوی شماره ۵	۱۷۰

## ادامه فهرست نمودارها

<u>شماره نمودار</u>	<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
نمودار ۶-۱۲	همبستگی پاسخ‌های به‌دست آمده از شبکه پس‌انتشار با پاسخ‌های حاصل از طراحی سازه برای الگوی شماره ۱۰	۱۷۰
نمودار ۶-۱۳	مقایسه سطح مقطع ۱۷۱ عضو سازه به‌دست آمده از شبکه پس‌انتشار و جواب‌های محاسباتی برای الگوی شماره ۱۰	۱۷۱
نمودار ۶-۱۴	همبستگی پاسخ‌های به‌دست آمده از شبکه پایه شعاعی با پاسخ‌های حاصل از طراحی سازه برای الگوی شماره ۵	۱۷۳
نمودار ۶-۱۵	همبستگی پاسخ‌های به‌دست آمده از شبکه پایه شعاعی با پاسخ‌های حاصل از طراحی سازه برای الگوی شماره ۱۰	۱۷۳
نمودار ۶-۱۶	مقایسه سطح مقطع ۱۷۱ عضو سازه به‌دست آمده از شبکه پایه شعاعی و جواب‌های محاسباتی برای الگوی آزمایشی شماره ۱۰	۱۷۴

## فصل اول

### سازه‌های فضاکار

#### ۱.۱ مقدمه

سازه‌های فضاکار، گروهی از سازه‌ها هستند که رفتار آنها به صورت سه بعدی است و تحلیل آنها از طریق تجزیه به سازه‌های دوبعدی امکان‌پذیر نیست. این سازه‌ها معمولاً از تعداد بسیار زیادی عضو تشکیل شده‌اند که مجموعاً در مقابل بارهای وارده، که ممکن است در هر نقطه و با هر زاویه‌ای بر سازه وارد شود، مقاومت می‌کنند. هر عضو می‌تواند از مقاطع نورد شده، پیش‌ساخته یا ... تشکیل شود. مشخصه سه بعدی این سازه‌ها، از نوع صفحات تخت زیر اثر بار عمودی و نیز صفحات خمیده است.

متداول‌ترین نوع سازه‌های فضاکار قاب‌های فضایی است. قاب فضایی به یک سیستم سازه‌ای اسکلتی اطلاق می‌شود که اعضای آن مستقیم و رفتار آن به صورت سه بعدی باشد. در برخی از حالت‌ها، اجزای تشکیل‌دهنده یک قاب فضایی می‌تواند دو بعدی باشد. در حالت کلی، یک قاب فضایی شکل صفحه تخت یا خمیده را به خود می‌گیرد. در پاره‌ای از نوشته‌ها بین دو اصطلاح "قاب فضایی" و "خرپای فضایی" فرق گذاشته شده است، بدین معنی که خرپای فضایی به سازه‌ای گفته می‌شود که اتصالات بین اعضا مفصلی باشد و قاب‌های فضایی به سازه‌ای اطلاق می‌شود که اتصالات صلب دارد؛ اما در اغلب نوشته‌ها اصطلاح قاب فضایی را با مفهوم فراگیرتر به کار می‌برند که شامل خرپاهای فضایی هم می‌شود.

#### ۲.۱ تاریخچه

سازه‌های فضاکار نوع جدیدی از سیستم‌های سازه‌ای محسوب نمی‌شود. طی دو قرن گذشته، هزاران نوع از این سازه‌ها در شکل‌های مختلف ساخته شده است. صدها مقاله و کتاب در زمینه تحلیل، طراحی و اجرای این سازه‌ها چاپ و منتشر شده و فن‌آوری مربوط به این سازه‌ها در سطوح مختلف توسعه یافته

است. برخی از گنبد‌های چوبی قدیمی را می‌توان پیش درآمد سازه‌های فضا کار مدرن تلقی کرد. از آنجا که گنبد‌های دوره قرون وسطی با مصالح محکم‌تری ساخته شده بودند و اغلب آنها در اصل یک قاب یا خرابای فضایی را تشکیل می‌دادند، ساخت این سازه‌ها را می‌توان نوعی پیشرفت در ساخت قاب‌های فضایی دانست.

پیشرفت عمده در زمینه قاب‌های فضایی زمانی صورت گرفت که مهندس جوانی به نام "آگوست فویل" اهل لایپزیگ، در سال ۱۸۸۰ کتاب "نظریه سیستم‌های مشبک" را درباره سازه‌های فضا کار منتشر کرد. از بین افراد معدودی که تئوری‌های فویل را در زمینه محاسبات قاب‌های فضایی جدی گرفتند، می‌توان از گوستاو ایفل نام برد که براساس آموزه‌های فویل، برج معروف ایفل را در سال ۱۸۸۹ در شهر پاریس بنا کرد. این نخستین سازه فضا کار فولادی است که محاسبات آن بر پایه هندسه سه بعدی صورت گرفته است. این برج، که برای برپایی نمایشگاه جهانی پاریس بنا شد، قرار بود پس از خاتمه نمایشگاه خراب شود، لیکن بنای این ساختمان چنان خوب از کار درآمده بود که نه تنها خراب نشد، بلکه به عنوان نماد شهر پاریس شناخته شد.

علی‌رغم احداث چند سازه فضا کار با شکوه در نیمه دوم قرن نوزدهم و انتشار کتاب دیگری از فویل در سال ۱۸۹۲ با عنوان "سازه‌های مشبک سه بعدی"، تفاوت بین قاب‌های مسطح و فضایی سال‌های سال برای اغلب متخصصان ساختمانی ناشناخته ماند.

در سال ۱۹۰۷، مهندس برجسته‌ای به نام الکساندر گراهام بل، که بیشتر به واسطه اختراع تلفن شهرت یافته است، آزمایش‌های زیادی را در زمینه قاب‌های فضایی چند لایه‌ای پیش ساخته انجام داد. او ثروت و وقت زیادی را در توسعه ساخت ماشین‌های پرنده با استفاده از قاب‌های فضایی صرف کرد. بل با تولید انبوه واحدهای هشت وجهی متشکل از میله‌ها، لوله‌ها و صفحات پیش‌تینده استاندارد، موفق به ساخت هواپیماها و برج‌های مراقبت شد.

در سال ۱۹۴۰، روبرت لو ریکولایس<sup>۱</sup> از دانشگاه پنسیلوانیای آمریکا، مطالعات گسترده‌ای را بر روی تاشه‌های اسکلتی شکل‌های طبیعی انجام داد. او مشاهده کرد که نوع ژئودزیک صفحات کروی در سازه‌های اسکلتی برخی از جانوران دریایی به کار رفته است. براساس این مطالعات، او سندی درباره اقتصادی بودن قاب‌های فضایی ارائه کرد.

در دهه ۱۹۴۰، پس از ورود سیستم‌های پیش ساخته صنعتی به بازار فعالیت‌های ساختمانی، گرایش عمومی به کاربرد قاب‌های فضایی افزایش یافت، به طوری که طی چند دهه، صدها بلکه هزارها سازه فضاکار با شکوه و جالب توجه در سراسر جهان احداث شد و تأثیر شگرفی را در صنعت ساختمان برجای گذاشت.

توسعه سازه‌های فضاکار در نیمه دوم قرن بیستم، مدیون تلاش بی‌وقفه دانشمندان و محققان بسیاری از کشورهای مختلف جهان است که از جمله آنها باید از پروفیسور ماکوفسکی<sup>۲</sup> نام برد که به پدر سازه‌های فضاکار شهرت یافته است. او با تأسیس مرکز تحقیقاتی سازه‌های فضاکار در دانشگاه ساری انگلستان و انتشار مجله بین‌المللی سازه‌های فضاکار و نیز طراحی تعداد زیادی از سازه‌های فضاکار در گوشه و کنار جهان و نظارت بر اجرای آنها گام‌های بلندی در پیشبرد مبانی نظری و عملی این نوع سازه‌ها برداشت.

### ۳.۱ انواع سازه‌های فضاکار

با توجه به گستردگی و تنوع فرم‌های سازه‌های فضاکار، طبقه‌بندی این نوع سازه‌ها بسیار دشوار است. به‌طور کلی، سازه‌های فضاکار را می‌توان به سه گروه عمده طبقه‌بندی کرد:

۱. قاب‌های اسکلتی (Skeleton Frameworks)؛

۲. سیستم‌های پوسته‌ای تنیده (Stressed Skin Systems)؛

---

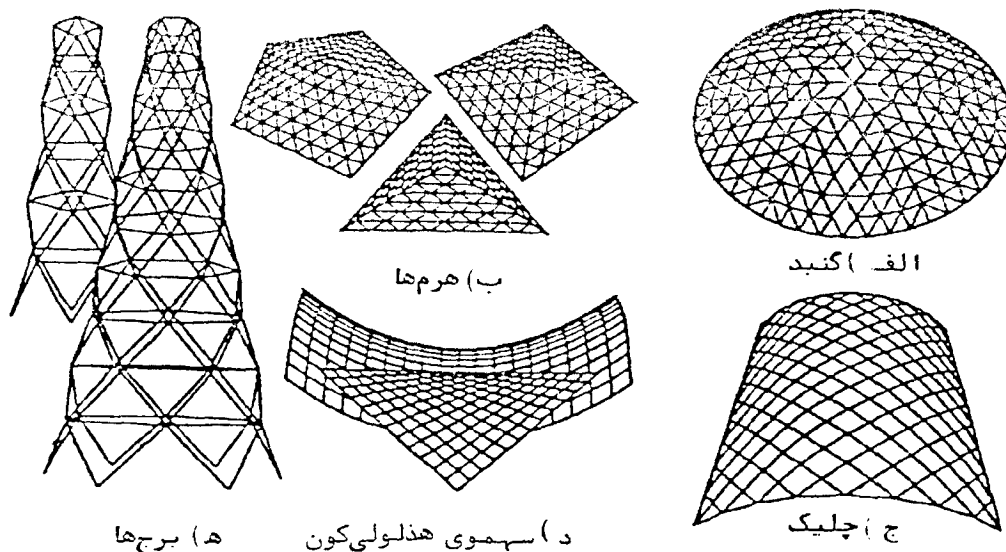
<sup>۱</sup>. Robert Le Recolais

<sup>۲</sup>. Makowski

### ۳. سازه‌های آویخته (Suspended Structures).

رفتار این سه گروه از سازه‌ها با یکدیگر متفاوت است و در نتیجه، روش‌های تحلیل آنها نیز با یکدیگر فرق دارد. از میان سازه‌های مذکور، قاب‌های اسکلتی کاربرد بیشتری دارد و این نوع قاب‌ها را سازه‌های مشبک یا قاب‌های فضایی نیز می‌گویند. شکل کلی سطح خارجی و الگوی اعضای این سازه‌ها می‌تواند در طرح معماری آنها مؤثر باشد. نظر به اینکه ترکیب‌های مختلف و بی‌شماری از این نوع سازه‌ها امکان‌پذیر است، سازه‌های باشکوه و بی‌همتایی با این سیستم ساخته شده است. بیشتر این نوع سازه‌ها به دلیل اقتصادی بودن، از فرم‌های هندسی منظمی تبعیت می‌کنند. این سازه‌ها را می‌توان در گروه‌های انحنای گوسی مثبت (مانند گنبدها)، انحنای گوسی منفی (مانند سهموی هذلولی‌گون) و انحنای گوسی صفر (مانند شبکه‌ها) طبقه‌بندی کرد. چلیک‌ها نوع خاصی از سازه‌های اسکلتی‌اند که در یک جهت دارای انحنای مثبت و در جهت دیگر دارای انحنای صفر هستند. صفحات تا شده پوسته‌ای تنیده، شبکه‌های پوسته‌ای تنیده، گنبدهای پوسته‌ای و چلیک‌های پوسته‌ای نمونه‌هایی از سیستم‌های پوسته‌ای تنیده به شمار می‌روند و سقف‌های کابلی از نوع سازه‌های آویخته محسوب می‌شوند.

نمونه‌ای از سازه‌های فضاکار از نوع قاب‌های اسکلتی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ نمونه‌ای از سازه‌های فضاکار