دانشکده عمران

گروه سازه

**پایان نامه**

**برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران– سازه**

**عنوان**

# بهینه سازی سازه‌های فضا کار خرپایی توسط الگوریتم اجتماع ذرات

اساتید راهنما:

**دکتر بهمن فرهمندآذر**

**دکتر علی حدیدی**

استاد مشاور:

**دکتر کامبیز کوهستانی**

پژوهشگر

**چیا فرهمندپور**

اردیبهشت ۱۳۹۰

## تقدیر و تشکر

این تحقیق را تقدیم می‌نمایم به:

**پدر** و **مادر** عزیز و بزرگوارم که در تمامی مراحل زندگی مرا حمایت و راهنمایی نمودند و همیشه کمک حال بنده بودند و می‌باشند.

اساتید گرانقدر دانشکده عمران به ویژه اساتید عزیز و دلسوزم

جناب آقای **دکتر بهمن فرهمند آذر**، جناب آقای **دکتر علی حدیدی** و جناب آقای **دکتر کامبیز کوهستانی** که در تمامی مراحل تهیه این پایان‌نامه، بنده را یاری و راهنمایی نمودند.

**برادر** بزرگوارم که چگونه فکر کردن و آموختن را به من آموخت.

**خواهران عزیز و مهربانم و همسرانشان** که همواره مشوق و حامی من در طی مراحل زندگی‌ام بوده اند.

در انتها از تمامی کسانی که در تهیه و تنظیم این پایان‌نامه بنده را یاری نموده‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

| |
|---|
| **نام خانوادگی دانشجو:** فرهمند پور **نام:** چیا |
| **عنوان پایان نامه:** بهینه سازی سازه‌های فضاکار خرپایی توسط الگوریتم اجتماع ذرات |
| **اساتید راهنما:** ۱- دکتر بهمن فرهمند آذر ۲- دکتر علی حدیدی **استاد مشاور:** دکتر کامبیز کوهستانی |
| **مقطع تحصیلی**: کارشناسی ارشد **رشته** :عمران **گرایش**: سازه **دانشگاه**: تبریز<br>**دانشکده**: مهندسی عمران **تاریخ فارغ التحصیلی** : اردیبهشت ۹۰ **تعداد صفحه** :۱۲۳ |
| **کلید واژه‌ها** : بهینه‌سازی،سازه‌های فضاکار خرپایی،الگوریتم اجتماع ذرات |


## چکیده:

امروزه توجه فزاینده به کمبود مواد خام و نقصان شدید منابع انرژی شناخته شده، موجب تمایل به داشتن سازه‌هایی سبک، کارا و ارزان قیمت شده است. این خواست به نوبه خود بر ضرورت آگاهی یافتن مهندسان از فنون بهینه‌سازی وزن و هزینه سازه‌ها تاکید می‌کند.

در سالهای اخیر بهینه سازی سازه ها شاهد تکنیک های جدید و ابداعی طراحی سازه‌ها بوده است .این روشهای جستجوی تصادفی از ایده های ناشی از طبیعت نشأت می گیرند و مشکلات روشهای ریاضیاتی، همچون پیوستگی تابع هدف، نیازمندی به محاسبه مشتقات توابع هدف وقیود و غیره را ندارند. این در حالیستکه این روشها صرفاً با ارزیابی توابع هدف توانایی یافتن نقاط بهینه کلی را دارند.

الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات (PSO) از جمله این الگوریتم‌ها می‌باشد. این الگوریتم بر اساس شبیه سازی اجتماعی دسته پرندگان و اجتماع ماهیها، اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط Eberhart و Kennedy ارائه گردید. این الگوریتم دارای یکسری مزایا می‌باشد که در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها آن را شاخص‌تر می‌کند. از جمله این مزایا می‌توان به تعداد کم پارامترهای تنظیمی، سادگی کاربرد و برنامه‌نویسی الگوریتم، سادگی مفاهیم و بدور بودن از پیچیدگی‌های محاسباتی همچون تبدیل متغییرهای طراحی و غیره میتوان نام برد.

اگرچه الگوریتم اجتماع ذرات دارای مزایای فوق می‌باشد اما یکی از معایب این الگوریتم گرفتار شدن در دام مینیمم های محلی و همگرایی زود رس به مینیمم‌های محلی در طول اجراهای متفاوت این الگوریتم می‌باشد. در این پایان‌نامه با مکانیسم‌های مختلف الگوریتم اجتماع ذرات برای مسائل بهینه سازی سازه های خرپایی تقویت شده است بطوریکه کیفیت ناشی از اجراهای متفاوت آن به طور چشمگیری افزایش یافته است. در نهایت الگوریتم تقویت شده اجتماع ذرات (IPSO) معرفی شده است.

یکی دیگر از معایب الگوریتم‌های مبتنی بر پدیده‌های طبیعی تعداد بسیار بیشتر ارزیابی تابع هدف نسبت به الگوریتم‌های مبتنی بر گرادیان می‌باشد. این مساله در بهینه سازی سازه‌ها که شامل آنالیزهای وقت گیر المان محدود در عوض ارزیابی تابعی چند متغییره می‌باشد بیش از پیش اهمیت

پیدا می‌کند. در این پایان نامه الگوریتمی ترکیبی از الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم سرد شدن شبیه سازی شده (SA)،(PSO-SA) پیشنهاد گردیده است. در الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم PSO با استفاده از تبادل اطلاعات بین ذرات مختلف بهترین نواحی فضای جستجو را می‌یابد و الگوریتم SA به جستجوی بیشتر در این مناطق می‌پردازد. در این الگوریتم به جای استفاده از تعداد زیاد ذرات به منظور جستجوی فضای مساله تعداد آنها کاهش داده شده است و در عوض بهترین مناطق یافته شده توسط آنها بیشتر مورد جستجو قرار گرفته است. با کاهش تعداد ذرات در الگوریتم پیشنهادی، تعداد آنالیزهای المان محدود برای دست‌یابی به جواب نهایی به طور چشمگیری پایین آمده است. این در حالیست که قابلیت اعتماد الگوریتم برای رسیدن به جواب مطلوب افزایش نشان داده است.

**فصل اول ..... ۱**

**سازه های فضاکار ..... ۱**

**۱-۱- مقدمه ..... ۲**

**۱-۲-تعریف سازه های فضایی ..... ۳**

**۱-۳- مزایای سازه های فضایی ..... ۳**

**۱-۴- اجزای سازه فضایی ..... ۴**

**۱-۵- عضوها ..... ۵**

**۱-۶- اتصالات گرهی ..... ۵**

**۱-۷- نسل جدید اتصالات گرهی Mero ..... ۶**

**۱-۸- سیستم های Modular (واحدی) ..... ۷**

۱-۸-۱- سیستم Space Deck ..... ۷

۱-۸-۲- سیستم Unibat ..... ۷

**۱-۹- انواع سازه های فضا کار خرپایی ..... ۸**

۱-۹-۱- شبکه های تخت ..... ۸

۱-۹-۲- شبکه های چلیک ..... ۹

۱-۹-۳- گنبد ..... ۱۰

۱-۹-۴- انواع دیگری از خرپاها ..... ۱۱

۱-۹-۵- شبکه های تک لایه، دو لایه و سه لایه ..... ۱۱

**فصل دوم ..... ۱۳**

**بهینه سازی ..... ۱۳**

**۲-۱- مقدمه ..... ۱۴**

**۲-۲- بهینه سازی و اجزاء آن ..... ۱۴**

۲-۲-۱– متغییرها طراحی ۱۵
۲-۲-۲- تابع هدف ۱۵
۲-۲-۳ - توابع محدودیتی یا قیود ۱۶
۲-۲-۳ - انواع قیود در مساله بهینه سازی خرپاها ۱۷
۲-۲-۳-۱- قیود طراحی ۱۷
۲-۲-۳-۲- قیود رفتاری ۱۸

**۲-۳- رابطه سازی استاندارد یک مساله بهینه سازی ۱۸**

**۲-۴- معرفی روشهای مختلف جستجو ۱۹**
۲-۴-۱- روشهای ریاضی ۱۹
۲-۴-۲- روشهای شمارشی ۱۹
۲-۴-۳- روشهای تصادفی ۱۹

**۲-۵- بهینه سازی سازه ها ۲۰**
۲-۵-۱- بهینه سازی اندازه ۲۰
۲-۵-۲- بهینه سازی هندسی ۲۱
۲-۵-۳- بهینه سازی توپولوژی ۲۱

## فصل سوم ۲۲

## الگوریتم اجتماع ذرات ۲۲

**۳-۱- پیدایش اولیه الگوریتم اجتماع ذرات(PSO) ۲۳**
۳-۱-۱- بردار مزرعه ذرت ۲۳
۳-۱-۲- حذف متغییرهای فرعی ۲۴
۳-۱-۳- جستجوی چند بعدی: ۲۵
۳-۱-۴- شتاب گرفتن به نسبت فاصله ۲۵
۳-۱-۵- نسخه ساده شده فعلی ۲۶

**۳-۲- الگوریتم (PSO) به شکل فعلی ۲۶**

**۳-۳- انتخاب پارامترها ۲۷**
۳-۳-۱- سرعت ماکزیمم ۲۸
۳-۳-۲- پارامتر کنترل ۳۱

۳-۳-۳- اثر تصادفی بودن پارامتر کنترلی $\varphi$ ۳۴
۳-۳-۳- کنترل انفجار ۴۴
۳-۳-۳-۱- ساده ترین ضریب انقباض ۴۵
۳-۳-۴- وزن اینرسی ۴۷

**۳-۴- توپولوژی های همسایگی ۵۴**

**۳-۵- مقایسه با الگوریتمهای تکاملی دیگر: ۵۶**

**۳-۶- بهینه سازی گسسته ۶۰**
۳-۶-۱- الگوریتم اجتماع ذرات باینری ۶۰
۳-۶-۲-الگوریتم اجتماع ذرات صحیح ۶۲

## فصل چهارم ۶۳

## بهینه سازی خرپاها توسط الگوریتم های اجتماع ذرات ۶۳

**۴-۱- مساله بهینه سازی خرپاها ۶۴**

**۴-۲- الگوریتم PSO مورد استفاده ۶۷**

**۴-۳- الگوریتم تقویت شده پیشنهادی ۶۸**
۴-۳-۱- مکانیسم برخورد با ذرات با تجاوز از محدوده مجاز قیود ۶۹
۴-۳-۲- الگوریتم اکتشافی PSO (HPSO) ۷۰

**۴-۴- الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و سرد شدن شبیه سازی شده پیشنهادی ۷۴**
۴-۴-۱- الگوریتم سرد شدن تدریجی شبیه سازی شده(SA) ۷۵
۴-۴-۲- الگوریتم بهینه سازی SA ۷۶
۴-۴-۲-۱- پارامتر بولتزمن ۷۷
۴-۴-۲-۲- زمان بندی سرد شدن ۷۸
۴-۴-۳- روشهای جستجوی محلی و روشهای مبتنی بر جمعیت ۷۸
۴-۴-۴- الگوریتم ترکیبی پیشنهادی ۷۹

**۴-۵- نمونه های طراحی ۸۴**
۴-۵-۱- خرپای ده عضوی ۸۴
۴-۵-۲- خرپای دو بعدی هفده عضوی ۸۸

۴-۵-۳- خرپای دو بعدی هجده عضوی ..... ۹۱
۴-۵-۴- خرپای بیست و دو عضوی ..... ۹۴
۴-۵-۵- خرپای بیست و پنج عضوی ..... ۹۷
۴-۵-۶- خرپای هفتاد و دو عضوی ..... ۱۰۳
۴-۵-۷- گنبد صد و بیست عضوی ..... ۱۰۹

**نتیجه گیری ..... ۱۱۴**

**پیشنهاد برای کارهای آتی ..... ۱۱۶**

**مراجع و مآخذ ..... ۱۱۷**

# فهرست اشکال


شکل۱-۱- سیستم Mero ..... ۶
شکل ۱-۲- سیستم Space Deck (a) اجزا (b) طریقه مونتاژ ..... ۷
شکل ۱-۳- سیستم Unibat ..... ۸
شکل ۱-۴- چند نمونه شبکه دو لایه ..... ۹
شکل ۱-۵- چند نمونه چلیک ..... ۱۰
شکل ۱-۶- چند نمونه گنبد ..... ۱۱
شکل ۲-۱- تقسیم بندی فضای جستجو ..... ۱۷
شکل ۳-۱- بروز رسانی سرعت وموقعیت ذره در الگوریتم اجتماع ذرات ..... ۲۷
شکل۳-۲- در این شکل الگوریتم بدون محدودیت سرعت اجرا شده است ،دیده میشود ..... ۲۹
که ذره به سرعت مسیرش واگرا میشود ..... ۲۹
شکل۳-۳- قید Vmax برابر ۲ انتخاب شده است.توجه داریم که ذره به مقدار بهینه که در این مثال ۰ میباشد
همگرایی ندارد ..... ۳۰
شکل۳-۴- قید Vmax برابر ۰/۲ انتخاب شده دیده میشود این کاهش دامنه نوسان حول مقدار بهینه را کاهش
میدهد ..... ۳۱
شکل۳-۵- هنگامی که $\varphi = 0.01$ ،مقدار کوچکی میشود ذره دور از مقدار بهینه حرکت میکند قبل از اینکه ..... ۳۲
مقدار جمع شده ترم تفاضلی $(p - x)$ آن را به سمت عقب برگرداند ..... ۳۲
شکل۳-۶- افزایش $\varphi$ به ۰/۱ دامنه حرکت را کاهش میدهد درحالیکه حرکت هنوز به صورت سینوسی در اطراف .... ۳۲
مقدار بهینه ۰ میباشد ..... ۳۲
شکل۳-۷- هنگامی که مقدار $\varphi = 1$ میباشد ..... ۳۲
شکل۳-۸- هنگامی که مقدار $\varphi = 10$ میباشددر بسیاری از اوقات ذره با گام Vmax حرکت میکند ..... ۳۳
شکل۳-۹- هنگامی که$\varphi$ مقدار بزرگی است،برای مثال در این مثال مقدار ۱۰۰ ،تقریبا در تمامی زمانها با گام Vmax
حرکت میکند.این مسیر غیر موثر نقاط مشابهی را در طول زمان به صورت تکراری جستجو میکند ..... ۳۳
شکل ۳-۱۰- مسیر حرکت ذره با $\varphi$ ها مختلف بدون فاکتور تصادفی بودن آن ..... ۴۲
شکل ۳-۱۱- مسیر حرکت ذره با $\varphi$ ها مختلف بدون فاکتور تصادفی بودن آن ..... ۴۳
شکل۳-۱۲- ضریب انقباض "taype 1 موجب همگرایی مسیر ذره در طول زمان میباشد ..... ۴۶
شکل۳-۱۳- اگر ۲ نقطه بهترین نزدیک یکدیگر باشند همانطور که در این مورد هر دو مساوی ۲ میباشند مسیر ذره
"Taype 1 همگرا میشود.به عبارت دیگر دامنه نوسان ذره به فاصله ۲ بهترین مقیاس میشود ..... ۴۶
شکل۳-۱۴- هنگامی ۲ بهترین وجود دارد،بهترین موقعیت دیده شده فردی و کل همسایگی فاصله بین آنها موجب
میشود ذره "Type 1 در یک فضای بزرگ به جستجو ادامه دهد ،بدون همگرایی ..... ۴۷
شکل۳-۱۵- اگر نقطه بهترین جدیدی یافت شود پس از اینکه ذره به همگرایی رسید ،مسیر بر اساس فاصله جدید بین
۲ بهترین دوباره مقیاس میشود،در اینجا بعد از ۱۰۰ تکرار نقطه بهتری یافت شده است. ..... ۴۷

شکل۳-۱۶- مقادیری از $\varphi 2, \varphi 1$ و$w$ که برای آن مقادیر $\gamma$ مختلط میباشد..... ۵۰
شکل۳-۱۷- مثلث سیاه در گوشه سمت راست مقادیری را نشان میدهد که ذره اکیدا ناهمگرا خواهد بود وبه عبارت دیگر $\max\lambda 1, \lambda 2 > 1$ این ناحیه است که درآن $w < 0.5(\phi 1 + \phi 2)$ ناحیه های روشنتر مقدار $\max\lambda 1, \lambda 2$ با مقدار سفید ۱.ناحیه های تاریکتر (خارج از منطقه غیر همگرایی) مقادیری را نشان میدهد منجر به همگرایی سریعتر میشوند..... ۵۳
شکل۳-۱۸- نمایش سه بعدی مقادیر $\max\lambda 1, \lambda 2$ .توجه داریم که ارتفاع قسمت راست گوشه بیشتر از ۱ است..... ۵۳
شکل ۳-۱۹- توپولوژی ها مختلف همسایگی..... ۵۶
شکل ۴-۱- هندسه و شرایط تکیهگاهی خرپای ده عضوی..... ۶۹
شکل ۴-۲- فلوچارت PSO-SA..... ۸۳
شکل ۴-۳- نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای خرپای ده عضوی(حالت اول)..... ۸۶
شکل ۴-۴- نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای خرپای ده عضوی( حالت دوم)..... ۸۷
شکل ۴-۵ - هندسه و شرایط تکیه گاهی خرپای هفده عضوی..... ۸۹
شکل ۴-۶- نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای خرپای هفده عضوی..... ۹۱
شکل ۴-۷- هندسه و شرایط تکیه گاهی خرپای هیجده عضوی..... ۹۱
شکل ۴-۸- نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای خرپای هجده عضوی..... ۹۳
شکل ۴-۹- هندسه و شرایط تکیه گاهی خرپای بیست و دو عضوی..... ۹۴
شکل ۴-۱۰- نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای خرپای بیست و دو عضوی..... ۹۶
شکل ۴-۱۱- هندسه و شرایط تکیه گاهی خرپای بیست و پنج عضوی..... ۹۷
شکل ۴-۱۲- نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای خرپای بیست و پنج عضوی(حالت اول)..... ۱۰۰
شکل ۴-۱۳- نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای خرپای بیست و پنج عضوی(حالت دوم)..... ۱۰۲
شکل ۴-۱۴- هندسه و شرایط تکیه گاهی خرپای هفتاد و دو عضوی..... ۱۰۴
شکل ۴-۱۵- نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای خرپای هفتاد و دو عضوی(حالت اول)..... ۱۰۷
شکل ۴-۱۶- نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای خرپای هفتاد و دو عضوی(حالت دوم)..... ۱۰۷
شکل ۴-۱۷- هندسه و شرایط تکیه گاهی گنبد صد و بیست عضوی..... ۱۱۰
شکل۴-۱۸- نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای گنبد صد و بیست عضوی(حالت اول)..... ۱۱۱
شکل۴-۱۹ - نحوه همگرایی الگوریتمهای PSO به جواب بهینه برای گنبد صد و بیست عضوی(حالت دوم)..... ۱۱۲

# فهرست جداول


جدول ۴-۱ – نتایج حاصل از پنجاه بار اجرای الگوریتمهای مختلف برای بارگذاری (حالت ۱)..... ۷۱
جدول۴-۲ – نتایج حاصل از پنجاه بار اجرای الگوریتمهای مختلف برای بارگذاری (حالت ۲)..... ۷۱
جدول ۴-۳- مقایسه نتایج طراحی بهینه خرپای ده عضوی(حالت اول)..... ۸۵
جدول ۴-۴- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای خرپای ده عضوی(حالت اول)..... ۸۶
جدول ۴-۵- مقایسه نتایج طراحی بهینه خرپای ده عضوی(حالت دوم)..... ۸۶
جدول ۴-۶- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای خرپای ده عضوی(حالت دوم)..... ۸۷
جدول ۴-۷- مقایسه نتایج طراحی بهینه خرپای هفده عضوی..... ۹۰
جدول ۴-۸- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای خرپای هفده عضوی..... ۹۰
جدول ۴-۹- مقایسه نتایج طراحی بهینه خرپای هیجده عضوی..... ۹۲
جدول ۴-۱۰- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای خرپای هجده عضوی..... ۹۲
جدول ۴-۱۱- شرایط بارگذاری سه گانه خرپای بیست و دو عضوی..... ۹۴
جدول ۴-۱۲- محدودیتهایتنشی خرپای بیست و دوعضوی..... ۹۵
جدول ۴-۱۳- مقایسه نتایج طراحی بهینه خرپای بیست و دو عضوی..... ۹۵
جدول ۴-۱۴- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای خرپای بیست و دو عضوی..... ۹۶
جدول ۴-۱۵- مختصات گره های خرپای بیست و پنج عضوی..... ۹۸
جدول ۴-۱۶- گره بندی اعضاء خرپای بیست و پنج عضوی..... ۹۸
جدول ۴-۱۷- بارگذاری یگانه خرپای بیست و پنج عضوی..... ۹۸
جدول ۴-۱۸- مقایسه طراحی بهینه سازی خرپای بیست و پنج عضوی (حالت اول)..... ۹۹
جدول ۴-۱۹- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای خرپای بیست و پنج عضوی(حالت اول)..... ۹۹
جدول ۴-۲۰- شرایط بارگذاری دوگانه خرپای بیست و پنج عضوی (حالت دوم)..... ۱۰۰
جدول ۴-۲۱- محدودیتهای تنشهای محوری خرپای بیست و پنج عضوی (حالت دوم)..... ۱۰۱
جدول۴-۲۲- مقایسه نتایج طراحی بهینه خرپای بیست و پنج عضوی (حالت دوم)..... ۱۰۱
جدول ۴-۲۳- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای خرپای بیست و پنج عضوی(حالت دوم).... ۱۰۲
جدول۴-۲۴- شرایط بارگذاری دوگانه خرپای هفتاد ودوعضوی..... ۱۰۴
جدول ۴-۲۵- مقایسه نتایج طراحی بهینه خرپای هفتاد و دو عضوی (حالت اول)..... ۱۰۶
جدول ۴-۲۶- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای خرپای هفتاد و دو عضوی(حالت اول)..... ۱۰۶
جدول ۴-۲۷- مقایسه نتایج طراحی بهینه خرپای هفتاد و دو عضوی (حالت دوم)..... ۱۰۸
جدول ۴-۲۸- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای خرپای هفتاد و دو عضوی(حالت اول)..... ۱۰۸
جدول ۴-۲۹- مقایسه نتایج طراحی بهینه گنبد صد و بیست عضوی..... ۱۱۱
جدول ۴-۳۰- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای گنبد صد و بیست عضوی(حالت اول)..... ۱۱۲
جدول ۴-۳۱- مقایسه نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر الگوریتم برای گنبد صد و بیست عضوی(حالت دوم)..... ۱۱۲

## مقدمه

امروزه سازه‌های فضاکار خرپایی با توجه به کاربردهای گوناگون آنها بیش از پیش اهمیت پیدا کرده‌اند. علت استفاده فروان از این نوع خاص سازه‌ها مزایای آنها شامل مشارکت اغلب اعضای سازه در تقسیم و توزیع بار، ویژگی مقاوم بودن آنها (به طوریکه فروریختن تعداد محدودی از اعضا لزوماً منجر به فروپاشی سازه نمی‌شود)، پوشاندن دهانه‌های بزرگ با حداقل مواد مصرفی، راحتی اجرا و غیره می-باشد. با توجه به معمول بودن و فراوانی استفاده از این سازه‌ها بهینه‌سازی آنها شامل مینیمم کردن وزن آنها می‌تواند نقش قابل ملاحظه‌ای در پایین آوردن هزینه‌ها ایفا کند.

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) یکی از جدیدترین الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد که در سال ۱۹۹۵ توسط (Eberhart & Kennedy) معرفی شد. این الگوریتم از شبیه سازی محیط اجتماعی ساده شده شروع شد و نیت اصلی آن شبیه سازی تصویری حرکت زیبا و غیر قابل پیش بینی گروه پرندگان بود. این روش بهینه سازی یکی از الگوریتم های مبتنی بر جمعیت می‌باشد و توسط جمعیتی از ذرات که به طور تصادفی در فضای جستجوی مساله مورد نظر پخش شده اند شروع به جستجو می‌کند از طرفی طی تکرارهای متوالی الگوریتم، هر ذره در فضای جستجو به سمت بهترین موقعیت دیده شده فردی خود و با تبادل اطلاعات بین ذرات مختلف در جهت بهترین موقعیت دیده شده در اجتماع پرواز می‌کند. با گذشت زمان در طی فرایند بهینه‌سازی، ذرات تدریجاً به سمت بهترین موقعیت های یافت شده در فضای جستجو مساله حرکت می‌کنند و شانس یافتن مناطق بهینه و جواب‌های بهینه را می‌یابند. از مزایای این الگوریتم می توان به تعداد کم پارامترهای تنظیمی، سادگی کاربرد و به دور بودن از پیچیدگی های محاسباتی اشاره کرد. هدف تحقیق حاضر بهینه‌سازی سازه های فضاکار خرپایی با استفاده از این الگوریتم می‌باشد.

در تحقیق حاضر، در فصل اول به معرفی سازه‌های خرپایی، کاربرد و مزایای آنها می‌پردازیم، در فصل دوم تعریف بهینه سازی و کلیاتی درباره آن و مفاهیم اساسی بهینه‌سازی و همچنین شاخه‌های مختلف بهینه‌سازی خرپاها را بررسی می‌کنیم. در فصل سوم کلیات و اصول اساسی الگوریتم اجتماع ذرات ذرات ارائه می‌شود. در فصل چهارم به بیان مساله بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی می‌پردازیم و از الگوریتم اجتماع ذرات برای بهینه سازی این سازه‌ها کمک می‌گیریم. در این فصل برای بهبود الگوریتم مکانیسم‌هایی به آن اضافه می‌شود که عملکرد آن را در بدست آوردن نتایج بهینه افزایش دهد. همچنین به معرفی الگوریتمی ترکیبی از دو الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم سرد شدن شبیه-سازی شده می‌پردازیم که کارایی الگوریتم اجتماع ذرات را بالا می‌برد و با تعداد بسیار کمتر آنالیزهای

المان محدود به جوابهای بهینه دست می‌یابد این درحالیستکه قابلیت اعتماد الگوریتم را نیز در یـافتن راه‌حل‌های مطلوب افزایش می‌دهد. پایان بخش این فصل حـل عـددی چنـد مثـال محـک در زمینـه بهینه‌سازی خرپاها و مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج سایر روشهای بهینه یابی می‌باشد. در پایان نتایج مطالعه حاضر و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی آورده شده است.

# فصل اول

# سازه های فضاکار

## ۱-۱- مقدمه

سازه فضایی یکی از مهمترین سیستم‌های سازه‌ای است که در ساختمان‌های مدرن با ابعاد بزرگ، کاربرد فراوان دارد. در مقایسه با سایر سیستم‌های سازه‌ای، سازه فضایی دارای چندین مزیت اساسی است که یکی از این مزایا سبکی آن است. سبکی سازه بیشتر به این دلیل است که مصالح توزیع فضایی دارند، به گونه‌ای که مکانیزم انتقال بار عمدتاً محوری، کششی یا فشاری است. بنابراین از مصالح عضوهای سازه به طور کامل استفاده می‌شود. در سقف‌های با دهانه بزرگ که وزن خود سازه بخش مهمی از بار کل را تشکیل می‌دهد، سبکی عضوهای تشکیل دهنده سازه تاثیر زیادی در اقتصاد و منطقی بودن کل ساختمان دارد.

مزیت دیگر سازه فضایی این است که تولید و ساخت عضوهای آن، در مقایسه با سایر سیستم‌های سازه‌ای، در سطحی بسیار وسیعتر و با استفاده از روش‌های صنعتی انجام می‌شود. عضوها و اتصالات آن عموماً پیش‌ساخته است و بنابراین، عملیات اتصال عضوها به یکدیگر در محل کارگاه نسبتا ساده است. از این رو، قطعات یک سازه فضایی را غالباً کارگران نیمه متخصص نیز می‌توانند سوار کنند. وزن سبک تک تک عضوها، محل و مونتاژ آنها را ساده‌تر کرده است. یک سازه فضایی با وجود سبکی وزنش سختی مناسبی دارد. این امر ناشی از ویژگی سه بعدی و مشارکت کامل عضوهای تشکیل دهنده آن است، به طوریکه این سازه‌ها خودشان را تقریباً با همه انواع بارگذاری‌ها بخوبی سازگار می-کنند.

از دیدگاه تاریخی، اولین سازه‌های فضایی، گنبدهایی بود که توسط مهندسان آلمانی Schwedler و Zimmerman که در قرن نوزدهم از پیشگامان این علم بودند ساخته شد. ساخت دهانه ۳۶۱ فوتی برای سازه نمایشگاه لیون در سال 1894 میلادی توسط Zimmerman کامل شد. گنبد از نوع Schwedler بلافاصله پس از جنگ جهانی دوم بر فراز مرکز مهندسی شارلوت در کارولینای شمالی آمریکا ساخته شد که طول دهنه آن حدود ۳۳۲ فوت بود. در واقع، سازه‌هایی با این ابعاد در آن زمان، بزرگ و قابل توجه بودند. این تجربه‌های آغازین، تقریباً تا سال ۱۹۳۷ که دکتر Mangeringhausen تمایل به سازه‌های فضا کار را دوباره رواج داد، فراموش شده بود. او دریافته بود که رواج سازه‌های فضایی در مقیاس بزرگ جهانی، فقط در صورتی امکان پذیر خواهد بود که اجزای سازه به صورت کارخانه‌ای تولید و مونتاژ آن در محل انجام شود. برای دستیابی به این دو هدف لازم بود که تنوع عضوی کاهش یابد و روش مونتاژ آسان توسعه پیدا کند. به طور مطلوب یک سازه فضایی باید شامل عضوهای با طول مساوی باشد. بنابراین، در عمل سعی می‌شود که تعداد طول‌های متفاوت تا حد امکان کاهش یابد. تحقیقات پیشگامانه دکتر Mangeringhausen به کاهش تنوع معطوف بود و اختراع اتصال Mero او به خوبی مشکل مونتاژ را حل کرد. با این پیشرفت‌ها Mangeringhausen توانست با موفقیت سازه‌های فضاکار را در سال ۱۹۴۲ به صورت تجاری درآورد. روش کار Mangeringhausen موجب پیشرفت‌های مشابهی در سراسر جهان شد. در

سال‌های بعد جهان، شاهد افزایش سیستم‌های خاص بود. Octatube، Nodus ، Unibat ، Space Deck ، Triodetic و مشتقات آنها از جمله سیستم‌هایی هستند که در این دوره در قسمت‌های مختلف جهان گسترش یافتند.

## ۱-۲-تعریف سازه های فضایی

با استناد به گزارشی که در رابطه با "وضعیت موجود سازه‌های فضاکار" توسط انجمن بین‌المللی پوسته‌ها و سازه‌های فضاکار[1] (IASS) در سال ۱۹۸۴ انتشار یافت می‌توان این تعریف را برای این سازه‌ها پذیرفت که یک سازه فضایی را می‌توان به صورت یک سیستم سازه‌ای در نظر گرفت که از عضوهای خطی تشکیل شده است و طرز قرارگیری آنها به گونه‌ای است که بارها به صورت سه بعدی منتقل می‌شود. در بعضی موارد، عناصر سازنده ممکن است دو بعدی نیز باشند. یک سازه فضایی اغلب شکل سطحی صاف یا منحنی گونه را به خود می‌گیرند.

در گزارش انجمن مهندسان راه و ساختمان آمریکا [2]که در سال ۱۹۷۶ انتشار یافت، سازه‌های فضایی به عنوان دسته‌ای از سازه‌های شبکه‌ای معرفی شده است. از ویژگی‌های سیستم‌های سازه‌ای شبکه‌ای این است که مکانیزم انتقال بار آن ها در حالت طبیعی سه بعدی است.

برخی اوقات بین قابهای فضایی و خرپاهای فضایی تمایز قائل می‌شوند بر طبق این تعریف خرپاهای فضایی سیستم‌هایی هستند که اتصالات آنها مفصلی است، در حالیکه واژه قابهای فضایی مخصوص سازه‌هایی است که اتصالات صلب دارند.

## ۱-۳- مزایای سازه های فضایی

۱) سازه‌های فضایی سبک هستند، بازده سازه‌ای خوبی دارند و در آنها از مصالح به صورت بهینه استفاده می‌شود

۲) برای پوشش فضاهای بزرگ بدون ستون با کاربری‌های متنوع، مانند ساختمانهای ورزشی، تالار سخنرانی، آشیانه‌های هواپیما و سالن‌های اجتماعات، استفاده از سازه‌های فضایی یک روش موثر و اقتصادی می‌باشد.

[1] International Association of Shell and Spatial Structure
[2] ASCE

۳) سازه‌های فضایی بارها را با عمل سه بعدی انتقال می‌دهند. بارهایی که به یک نقطه وارد می‌شوند، فقط به وسیله عضوهای منتهی به آن نقطه متحمل نمی‌شوند، بلکه با پخش بار در عضوهای متعدد دیگر آنها هم درتحمل بار کمک می‌کنند. بدین طریق می‌توان بارهای متمرکز سنگین را به هر گره انتقال داد. این ویژگی، به خصوص در آشیانه‌های نگهداری هواپیما بسیار مفید است، زیرا امکان آن را می‌دهد که سیستم‌های تعمیر کننده هواپیما از گره‌ها آویزان شوند و بدین ترتیب انعطاف پذیری نامحدودی ایجاد می‌شود.

۴) به دلیل سختی زیاد این سازه‌ها، تغییر مکانها کوچک است. این ویژگی در کاربرد سازه‌های فضایی به عنوان پشتبند برای آنتن‌های بشقابی سهموی، آنتن‌های چند بشقابی و تلسکوپ‌ها حائز اهمیت است، زیرا این سازه‌ها علاوه بر سبکی نیاز به صلبیت بالایی دارند.

۵) از آنجا که سازه‌های فضایی با درکنار هم قرار دادن اجزای دقیق کارخانه‌ای ساخته می‌شوند، کارگر غیر متخصص هم می‌تواند در مونتاژ واجرای آنها بکار گرفته شود.

۶) خدماتی مانند نورپردازی و تهویه می‌توانند با سازه‌های فضایی تلفیق شوند و غالباً این تاسیسات روی زمین نصب می‌شوند و بنابراین خطرهای کار در ارتفاع بر طرف می‌شوند.

۷) زمان ساخت سازه‌های فضایی کوتاه است، زیرا اجزای آنها در کارخانه و با روش‌های سریع تولید می‌شوند و پس از حمل به کار گاه براحتی نصب می‌شوند.

۸) هر کدام از اجزای سازه سبک بوده و این امر حمل و نقل ساده آنها را ممکن می‌سازد.

۹) این سازه‌ها به مهندس معمار آزادی نامحدودی برای تعیین محل تکیه‌گاهها و طراحی زیر مجموعه‌های فضایی سر پوشیده می‌دهد.

۱۰) به علت سبکی این سازه‌ها، بارهای مرده بسیار کوچک بوده و درنتیجه، در ستون‌ها و سایر عضوهای سازه‌ای صرفه‌جویی می‌شود.

## ۱-۴- اجزای سازه فضایی

یک سازه فضایی شامل عضوهای محوری و اتصالات آن است که مقطع عضوهای آن ترجیحاً لوله-ای است و می‌تواند دایره‌ای توخالی یا مستطیلی توخالی باشد. دیگر مقاطع سازه‌ای مانند $I,H$ هم گهگاه در این سازه‌ها بکار برده می‌شوند، به خصوص اگر بارها به عضوهای بین گره‌ها وارد شوند که در این صورت علاوه بر نیروی محوری، خمش نیز ایجاد می‌کنند. در جاییکه بارها فقط به گره‌ها وارد شوند مقاطع توخالی دایره‌ای و مستطیلی در مقایسه با مقاطع دیگر ارجحیت دارند، زیرا آنها در فشار

مناسب‌ترند و شعاع ژیراسیون بزرگتری برای مقاطع با سطوح یکسان قرار می‌دهند مقاطع توخالی دایره‌ای مزیت دیگری نیز دارند وآن اینکه ممان اینرسی آنها در همه جهت‌ها برابرند.

## ۱-۵- عضوها

عضوهای سازه‌های فضایی آلومنیومی یا فولادی هستند. عضوهای آلومنیومی وزن سبکی دارند ولی بسیار گرانند. اکثر سازه‌های فضایی از عضوهای فولادی با مقاومت تسلیم ۲۱۰ تا ۴۵۰ مگاپاسکال تشکیل می‌شوند.

## ۱-۶- اتصالات گرهی

Mero برگرفته از نام Mangeringhausen مخترع این اتصال است. اتصال Mero شامل عناصر زیر می‌باشد:

۱) گلوله کروی قلاویز شده‌ای از فولاد که به طور گرم آهنگری شده، با تعداد ۱۸ سوراخ قلاویز شده که با زاویه‌های مختلف در سراسر سطح آن پخش شده‌اند تا اعضای لوله‌ای را با زاویه‌های مختلف در خود جای دهند. سطح کره در اطراف سوراخ‌های قلاویز شده مسطح می‌شود تا پیچ‌های غلاف بهتر بر روی آن قرار گیرند. سوراخ‌ها به دقت ایجاد شده اند تا خط مرکزی لوله‌ها در مرکز کره اتصال به هم برخورد کند.

۲) پیچی که داخل سوراخی در عضو لوله‌ای قرار گرفته و از قسمت مخروطی که به انتهای لوله جوش شده است، می‌گذرد.

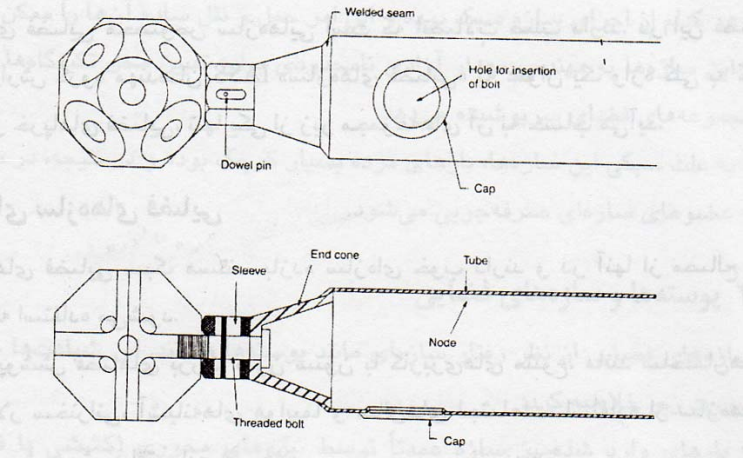
۳)مهره‌غلاف شش وجهی

۴)یک خار اتصال که از داخل پیچ رزوه شده می‌گذرد و آن را به مهره غلاف متصل می‌کند. برای اتصال عضو لوله‌ای به گره، عملیات با توالی زیر انجام می‌شود:

- لوله‌ها با طول دقیق بریده می‌شوند
- مخروط هایی به ۲ انتهای لوله‌ها جوش داده می‌شوند.
- عضوها همراه با مخروطها گالوانیزه می‌شوند.
- پیچها داخل سوراخهایی در انتهای عضوها قرار می‌گیرند. پیچهای اضافه شده به وسیله خار اتصال به مهره غلاف متصل می‌شوند.مهره غلاف هم گالوانیزه می‌شود.

- پیچها به وسیله مهره غلاف داخل سوراخهای کره اتصال قرار می‌گیرد.
- به منظور بهبود ظاهر اتصال، سوراخ‌های ایجاد شده برای برقرای پیچها در لوله‌ها را با کلاهک پلاستیکی می‌پوشانند

در شکل ۱-۱ جزییات این اتصال نشان داده شده است .این اتصال فقط برای انتقال نیروهای محوری مناسب است و عمدتاً در شبکه‌های دو لایه‌ای استفاده می‌شود.




شکل۱-۱- سیستم Mero

## ۱-۷- نسل جدید اتصالات گرهی Mero

در سال‌های اخیر، Mero چهار اتصال گرهی جدید معرفی کرده است به خصوص برای سازه-های فضایی تک لایه و پوسته گونه که نیاز به سختی خمشی درگره‌ها برای حفظ پایداری دارند، مناسب است. این اتصالات عبارتند از:

اتصال گرهی استوانه‌ای ZK

اتصال گرهی صفحه –دیسک TK

اتصال گرهی نیمکره توخالی NK

اتصال گرهی بلوک BK

برای اطلاعات بیشتر در مورد سیستم Mero می‌توان به کاتالوگ Mero مراجعه کرد.

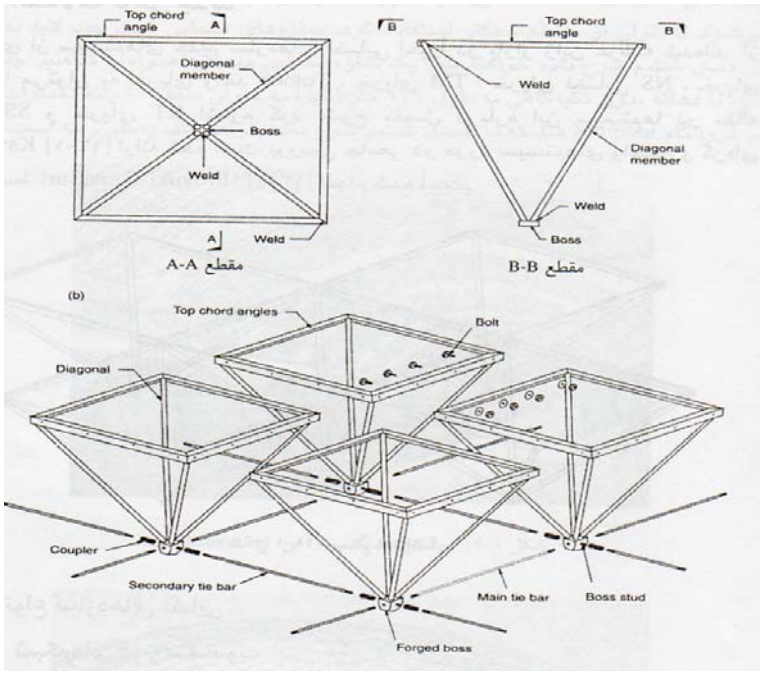
اتصالات گرهی دیگری همچون Octatube، Nodus ، Tuball، Triodetic نیز وجود دارند که توضیح بیشتر در مورد آنها در رفرنس [۱] آمده است.

## ۱-۸- سیستم های Modular (واحدی)

سیستم‌های سازه‌های فضایی به طور کلی به دو دسته گرهی و واحدی، طبقه بندی می‌شوند. سیستم‌های گرهی شامل عضوها و گره‌ها هستند. در سیستم‌های واحدی به جای اعضا، واحدهای پیش ساخته‌ای وجود دارند که به طور معمول به شکل هرم‌هایی هستند که با پیچ اصطکاکی مقاومت بالا به هم وصل شده‌اند.در اینجا دو سیستم معروف واحدی شرح داده می‌شوند.

### ۱-۸-۱- سیستم Space Deck

اجزای سیستم Space Deck در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. این سیستم را شرکت انگلیسی Space Deck ابداع کرد که از سال ۱۹۵۴ میلادی مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم از هرم‌های وارونه تولید شده در کارخانه، شامل عضوهای بالایی وچها عضو مهار بندی، تشکیل شده است. هرم‌ها به وسیله عضوهای پیوندی پایینی وپیچ‌ها به هم وصل می‌شوند.




شکل ۱-۲- سیستم Space Deck (a) اجزا (b) طریقه مونتاژ

### ۱-۸-۲- سیستم Unibat

اجزای سیستم Unibat و روش اتصال آنها به یکدیگر در شکل ۱-۳ آمده است. چهار عضو بالایی و چهار مهاربند قطری، هرم وارونه ساخته شده در کارخانه را تشکیل می‌دهد. قطعات آهنگری