





دانشکده: عمران و معماری

گروه: سازه

عنوان پایان نامه:

بهینه یابی هندسه و سطح مقطع سازه های فضاکار با استفاده از

الگوریتم ژنتیک

دانشجو: صالح حق پرست

استاد راهنما:

دکتر وحید رضا کلاتجاری

استاد مشاور:

دکتر سیروس غلامپور

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهر 1388

ب

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: عمران و معماری

گروه: سازه

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای.....

تحت عنوان: بهینه یابی هندسه و سطح مقطع سازه های فضاکار با استفاده از

الگوریتم ژنتیک

در تاریخ 89/11/17 توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	امضاء	امضاء	استاد راهنما
	دکتر سیروس غلامپور		دکتر وحید رضا کلاتجاری

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
			دکتر علی کیهانی
			دکتر سید فضل ا.. ساغروانی

تقدیم بہ

ساحت مقدس امام عہد مر

حضرت مہدی (عج) اور اہل آلہ العداء

با کمال اذیتان از اساتید گرامر سنگ

جناب آقایان دکتر و جید رضا کلات جاری و دکتر مریروس غلامدور،

که در این راه، روشنی بخش افکارم بودند...

با تقدیر جناب آقای مهندس حسین طالبدور

برای کمک های ارزنده شان...

بدر پاس ریاری

از خانوادۀ بهرامی حمایت های بی در نشان...

دانشجو تایید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن ذکر شده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

مهر ماه هزار و سیصد و هشتاد و نه

چکیده:

در این پایان نامه، بهینه یابی هندسه و سطح مقطع سازه‌های فضاکار تخت دو لایه با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر اساس آیین نامه فولاد ایران، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق ارائه برنامه کامپیوتری مطلوب و سهل الوصول برای کاربران است که بتوانند به تحلیل، طراحی و بهینه یابی سازه‌های فضاکار تخت 2 لایه که از جمله پرکاربردترین سازه های مورد استفاده در ساخت سالن های صنعتی بزرگ ، فرودگاه‌ها و ورزشگاه‌ها است، بپردازند. در الگوریتم ژنتیک ساده جواب‌های بهینه به پارامترهای آن بسیار وابسته هستند و ممکن است بهینه‌های محلی حاصل شوند. برای حل این مشکل در این پایان‌نامه از روش جستجوی چند منظوره استفاده شده است. از آنجایی که تعداد اعضای سازه‌های فضاکار زیاد می‌باشند لذا قیود مورد نظر از قبیل تنش، کمانش و تغییر مکان که باید از نظر آئین‌نامه، تایید شوند نیز زیاد است. این امر روند بهینه‌یابی را بسیار کند می‌کند لذا روشی پیشنهاد شده است که در طی آن قسمتی از ژن‌ها که سبب نقض قید می‌شوند شناسایی شده و در طی فرآیندی اصلاح می‌شوند تا قیود مورد نظر اقماع شوند. بدین ترتیب روند بهینه‌یابی بسیار سریع‌تر صورت می‌پذیرد. با طرح مثال‌هایی روش پیشنهادی صحت‌سنجی شده است. روش پیشنهادی در مثال کار شده تا 34% بهبود در کاهش وزن سازه نسبت به روش‌های قبلی ارائه می‌دهد. همچنین در حدود 33% کاهش وزن نسبت به نرم افزار sap2000 نیز حاصل شده است.

کلمات کلیدی:

بهینه سازی، سازه‌های فضاکار تخت دو لایه، الگوریتم ژنتیک، روش جستجوی چند منظوره

فصل اول: مقدمه

- 1-1 پیشگفتار 1
- 2-1 روش‌های بهینه‌سازی 2
- 1-2-1 روش‌های بهینه‌یابی کلاسیک و نوین 5
- 3-1 بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار 9
- 5-1 اهداف تحقیق 10
- 6-1 ساختار پایان نامه 11

فصل دوم: مفاهیم الگوریتم ژنتیک

- 1-2 مقدمه 13
- 2-2 تاریخچه الگوریتم ژنتیک 15
- 3-2 مبانی علم ژنتیک و مفهومات آن 19
- 1-3-2 الگوریتم ژنتیک 21
- 2-3-2 افراد یا کروموزوم 23
- 3-3-2 کدگذاری کروموزوم 23
- 1-3-3-2 روش کدگذاری جایگشتی 24
- 2-3-3-2 روش کدگذاری مقداری 24
- 3-3-3-2 روش کدگذاری درختی 25
- 4-3-3-2 کدگذاری باینری 26
- 4-3-2 تعیین جمعیت اولیه 31
- 5-3-2 تابع هدف 31
- 6-3-2 تابع جریمه 33
- 7-3-2 توابع هدف اصلاح شده 35
- 8-3-2 شایستگی 36
- 9-3-2 انتخاب 37
- 1-9-3-2 چرخ گردان 38
- 2-9-3-2 روش رتبه بندی 40
- 3-9-3-2 روش مسابقه‌ای 42

44.....	10-3-2 مفهوم برگزیده (شایسته سالاری) ..
44.....	11-3-2 عملگرهای GA
46.....	1-11-3-2 عملگر ادغام
47.....	1-1-11-3-2 روش ادغام تک نقطه‌ای یا مکانی
48.....	2-1-11-3-2 روش ادغام دو نقطه‌ای
49.....	3-1-11-3-2 نرخ ادغام
49.....	2-11-3-2 عمل معکوس سازی
50.....	3-11-3-2 عمل حذف و کپی
51.....	12-3-2 جهش
52.....	1-12-3-2 عمل جهش در کدگذاری دودویی
53.....	2-12-3-2 نرخ جهش
54.....	13-3-2 دستور خروج از الگوریتم

فصل سوم: بررسی سازه‌های فضاکار

57.....	1-3 مقدمه
58.....	2-3 تاریخچه
70.....	3-3 تعریف سازه‌های فضاکار
71.....	4-3 مزایای سازه فضاکار
73.....	5-3 سیستم‌های سازه فضاکار
73.....	1-5-3 سیستم‌های قطعه کوچک
75.....	1-1-5-3 گره‌های کروی
75.....	1-1-1-5-3 گره‌های کروی تو پر
82.....	2-1-1-5-3 گره‌های کروی تو خالی
85.....	2-1-5-3 گره‌های استوانه‌ای
88.....	3-1-5-3 گره‌های صفحه‌ای
90.....	4-1-5-3 اتصالات بدون گره
91.....	2-5-3 سیستم‌های با اعضای ممتد
91.....	1-2-5-3 سیستم هارلی

93.....	2-2-5-3 سیستم مای اسکای
95.....	3-5-3 مدول ها
96.....	1-3-5-3 سیستم اسپیس دک
100.....	2-3-5-3 سیستم یونی بات و اسپیس گرید
101.....	3-3-5-3 سیستم ABBA

فصل چهارم: بهینه یابی هندسه و سطح مقطع سازه ها با الگوریتم ژنتیک

104.....	1-4 مقدمه
106.....	2-4 فرمولبندی مسأله بهینه یابی مقاطع و هندسه سازه های فضاکار براساس GA
107.....	1-2-4 متغیرهای طراحی
108.....	2-2-4 تابع هدف
109.....	3-2-4 قید G1 و G2
110.....	3-2-4 قید G3 و G4
111.....	3-2-4 قید G5

فصل پنجم: راهنمای برنامه

114.....	1-5 مقدمه
116.....	2-5 روش جستجوی چند منظوره (M.S.M)
118.....	3-5 کلیات الگوریتم بهینه یابی مقاطع و هندسه سازه ها
121.....	1-3-5 الگوریتم تولید جمعیت اولیه
121.....	2-3-5 رمزگشایی هر کروموزوم
125.....	3-3-5 ماتریس سختی هر کروموزوم
126.....	4-3-5 تحلیل سازه مربوط به هر کروموزوم
127.....	5-3-5 تابع هدف و تابع جریمه مورد استفاده
128.....	6-3-5 تابع هدف اصلاح شده و تابع شایستگی مورد استفاده
129.....	7-3-5 روش جستجوی چند منظوره
130.....	1-7-3-5 جزیره (1)
133.....	2-7-3-5 جزیره (2)

136.....	3-7-3-5 جزیره (3)
139.....	4-7-3-5 جزیره (4)
142.....	5-7-3-5 جزیره (5)
146.....	8-3-5 روش پیشنهادی (اصلاح ژنتیکی کروموزوم)
147.....	9-3-5 بررسی همگرایی و کنترل تعداد مراحل نسل سازی

فصل ششم: مثال عددی

149.....	1-6 مقدمه
149.....	2-6 صحت سنجی برنامه ویژوال بیسیک
159.....	3-6 بهینه‌یابی سازه‌فضاکار 8×8

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

177.....	1-7 مقدمه
178.....	2-7 نتایج
180.....	3-7 پیشنهادات

فهرست اشکال

فصل اول

- شکل (1-1) بهینه‌یابی سطح مقطع در اعضای خرپایی 2
- شکل (2-1): سازه اولیه می‌باشد و سازه **b**، سازه بهینه شده توسط بهینه‌یابی هندسی 3
- شکل (3-1) بهینه‌یابی توپولوژی دو بعدی 3
- شکل (4-1) نمودار روش‌های بهینه‌یابی 4
- شکل (5-1) نمودار روش‌های کلاسیک و نوین بهینه‌یابی 6

فصل دوم

- شکل (1-2) کدگذاری جایگشتی 24
- شکل (2-2) کدگذاری مقداری 25
- شکل (3-2) کدگذاری درختی 26
- شکل (4-2) کدگذاری باینری 26
- شکل (5-2) نحوه‌ی بدست آوردن اعداد در مبنای 2 27
- شکل (6-2) مدلی از چرخ گردان 39
- شکل (7-2) موقعیت کروموزوم‌ها بر اساس روش چرخ گردان 41
- شکل (8-2) موقعیت کروموزوم‌ها پس از مرتب‌سازی بر اساس روش رتبه‌بندی 41
- شکل (9-2) شایستگی هر رشته 43
- شکل (10-2) کروموزوم‌های منتخب 43

- شکل (11-2) روش ادغام تک نقطه ای 47
- شکل (12-2) روش ادغام دو نقطه ای 48
- شکل (13-2) عمل معکوس سازی 50
- شکل (14-2) عمل حذف و کپی بیت‌های پیشین 50
- شکل (15-2) عمل حذف و تولید مجدد 51
- شکل (16-2) هشت رشته کروموزوم 51
- شکل (17-2) عمل جهش 53

فصل سوم

- شکل (1-3) کلیسای سانتاماریادل فیوره 59
- شکل (2-3) معبد تودای - جی 60
- شکل (3-3) تجارب اولیه سازه های فضاکار توسط الکساندر گراهام بل 62
- شکل (4-3) اتصال عمومی کنراد واچسمان 65
- شکل (5-3) سیستم سه وجهی اس.دی.سی 65
- شکل (6-3) مدول های هرمی سیستم یونی بات 66
- شکل (7-3) سیستم تریودتیک 67
- شکل (8-3) سازه ی سه چهارم کره ای باکمینستر فولر 68
- شکل (9-3) گره استاندارد سیستم kk مرو 76
- شکل (10-3) مقایسه یک سیستم سازه ای با رشد در طبیعت. مقطع یک پوسته حلزونی 77
- شکل (11-3) اعضای استاندارد مرو 78
- شکل (12-3) قطعات فلزی هولز 79

- 80..... شکل (13-3) استادیوم اسپلیت
- 81..... شکل (14-3) سقف جایگاه تماشاچیان در استادیوم اسپلیت
- 83..... شکل (15-3) گره های نودوس
- 86..... شکل (16-3) سیستم تریودتیک
- 87..... شکل (17-3) گره های تریودتیک
- 89..... شکل (18-3) گره های سیستم مودا اسپن یا یونی استارت
- 90..... شکل (19-3) سیستم خرپایی یونی استارت
- 92..... شکل (20-3) گره های اتصال عمومی سری 80 هارلی
- 94..... شکل (21-3) گره های معمول سیستم مای اسکای
- 96..... شکل (22-3) مدول های اسپیس دک
- 97..... شکل (23-3) رنوس ریخته شده در نوک هرم های اسپیس دک
- 99..... شکل (24-3) لبه های معمول و جزئیات اتصال شیشه در سیستم اسپیس دک
- 101..... شکل (25-3) سیستم مکعب فضایی ABBA
- 102..... شکل (26-3) سیستم مکعب فضایی ABBA با اتصال هشت وجهی

فصل پنجم

- 117..... شکل (1-5) روش جستجوی چند منظوره
- 119..... شکل (2-5) فلوچارت M.S.A برای بهینه یابی مقاطع و هندسه سازه ها
- 120..... شکل (3-5) فلوچارت روش جستجوی چند منظوره (M.S.M)
- 132..... شکل (4-5) پنجره ورودی اطلاعات جزیره (1)
- 135..... شکل (5-5) پنجره ورودی اطلاعات جزیره (2)

- 138..... شکل (5-6) پنجره ورودی اطلاعات جزیره (3)
- 141..... شکل (5-7) پنجره ورودی اطلاعات جزیره (4)
- 144..... شکل (5-8) پنجره ورودی اطلاعات جزیره (5)
- 145..... شکل (5-9) پنجره ورودی اطلاعات GA و فراخونی جزایر

فصل ششم

- 150..... شکل (6-1) سازه فضاکار تخت دو لایه $2*2$
- 160..... شکل (6-2) سازه فضاکار تخت دو لایه $8*8$
- 168..... شکل (6-3) تصویر سازه فضاکار بهینه
- 169..... شکل (6-4) نمودار خروجی برنامه به روش MSM
- 171..... شکل (6-5) نمودار خروجی برنامه به روش MSM و اصلاح ژنتیک حالت 100 تایی
- 172..... شکل (6-6) نمودار خروجی برنامه به روش MSM و اصلاح ژنتیک حالت 50 تایی
- 174..... شکل (6-7) نمودار خروجی برنامه مقایسه روش‌ها

فهرست جداول

فصل دوم

جدول (1-2) تخصیص کدهای حقیقی.....29

فصل پنجم

جدول (1-5) اطلاعات جزیره (1).....130

جدول (2-5) اطلاعات جزیره (2).....133

جدول (3-5) اطلاعات جزیره (3).....136

جدول (4-5) اطلاعات جزیره (4).....139

جدول (5-5) اطلاعات جزیره (5).....142

فصل ششم

جدول (1-6) مختصات نقاط گرهی.....151

جدول (2-6) مختصات نقاط تکیه گاهی.....151

جدول (3-6) مشخصات المانهای سازه.....152

جدول (4-6) بارگذاری گرهی.....153

جدول (5-6) تنشها و نیروهای داخلی اعضا.....154

جدول (6-6) خروجی برنامه sap2000.....155

جدول (7-6) مختصات نقاط گرهی.....161

جدول (8-6) مشخصات المانها.....163

فصل اول:

مقدمه

1-1 پیشگفتار

تمایل انسانی با توجه به مشخصه ذاتی وی ، او را به انجام اموری با بیشترین بهره‌وری و کمترین هزینه ممکن سوق می‌دهد تا به حداکثر منفعت نائل گردد. به طور کلی انتخاب و طراحی بهینه در بسیاری از مسائل علمی و فنی باعث تولید بهترین محصول یا جواب ممکن در یک شرایط خاص می‌شود تا کمترین مقدار انرژی مصرف شود [1]. برای مثال تولید محصولات مناسب در حوزه‌های مختلف فنی و مهندسی وابسته به طراحی دقیق و بهینه شکل، اندازه و قطعات آن محصول است

دلیل اصلی لاش برای افزایش بهره‌وری و بازدهی فعالیت‌ها ، منابع نسبتاً محدود طبیعت است. فلسفه پیدایش اهرم‌های مکانیکی و قرقره‌ها در دوران بسیار دور موید همین ویژگی انسانی است. امروزه، در طراحی ، ساخت و نگهداری هر سیستم مهندسی ، مهندسان باید تصمیمات مدیریتی و تکنولوژیکی متعددی را در مراحل مختلف اتخاذ کنند . هدف نهایی چنین تصمیماتی ، کمینه کردن انرژی لازم، در عین بدست آوردن بیشترین سود ممکن خواهد بود. میزان تلاش لازم یا سود مورد نظر در هر وضعیت عملی را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای تصمیم‌گیری مشخص

بیان کرد . بنابراین ، می توان بهینه سازی را به عنوان فرایند یافتن شرایطی که مقدار بیشینه و یا کمینه یک تابع را به دست می دهد، تعریف نمود . به عبارت دیگر طراحی بهینه عبارتست از: «بهترین طراحی قابل قبول بر اساس یک معیار کیفی و کمی شایستگی از پیش تعریف شده» [1] از آنجایی که برای حل مسائل موجود در بهینه سازی روش یکتایی وجود ندارد، روش های متنوعی از بهینه سازی برای حل مسائل مختلف بهینه سازی پدید آمده اند . که باید به فراخور محدودیتها و قابلیت ها ، روش متناسب با مسئله را انتخاب نمود.

2-1 روش های بهینه سازی

بطور کلی مسائل بهینه یابی سازه ها در چهار رده مختلف دسته بندی می شوند [2] که عبارتند از :

1. بهینه یابی سطح مقطع¹
2. بهینه یابی شکل یا هندسه سازه²
3. بهینه یابی توپولوژی سازه³
4. بهینه یابی پیکربندی⁴ سازه مشتمل بر 3 مورد قبل

بهینه سازی سطح مقطع به معنای بهینه کردن ضخامت و سطح مقطع اعضاء می باشد. (شکل 1-1)

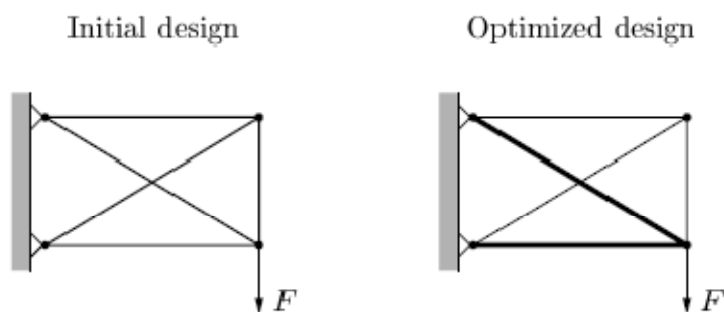
(1)

¹ . Sizing Optimization

² . Geometrical (Shape) Optimization

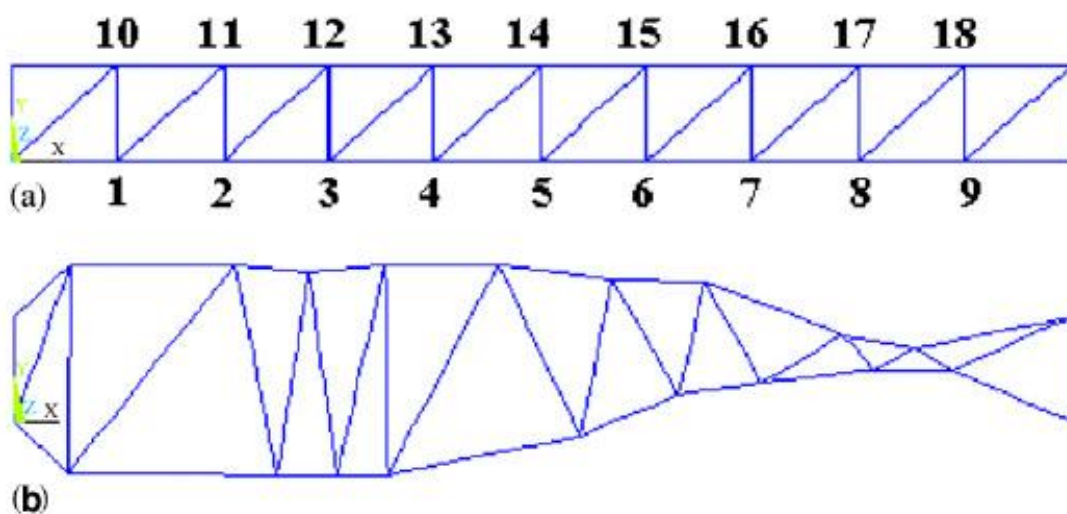
³ . Topological Optimization

⁴ . configuration



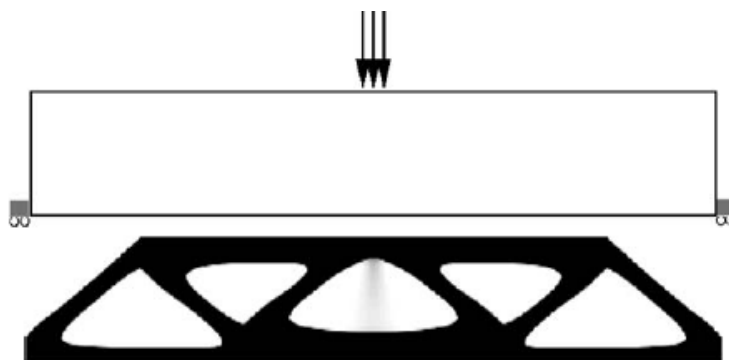
شکل (1-1) بهینه‌یابی سطح مقطع در اعضای خرپایی

در بهینه‌یابی هندسی آنچه که بهینه می‌گردد هندسه سازه به عبارت دیگر محل قرارگیری نقاط گرهی سازه می‌باشد. باید توجه داشت در این حالت نحوه‌ی اتصال اعضای سازه‌ای (توپولوژی) تغییر نمی‌کنند. (شکل 2-1). [3]



شکل (2-1): سازه اولیه می‌باشد و سازه b، سازه بهینه شده توسط بهینه‌یابی هندسی

در بهینه‌سازی توپولوژی محیط‌های پیوسته، هدف پیدا کردن تعداد مناسب حفره‌ها و محل آن‌ها می‌باشد [4]. شکل (3-1)



شکل (3-1) بهینه‌یابی توپولوژی دو بعدی

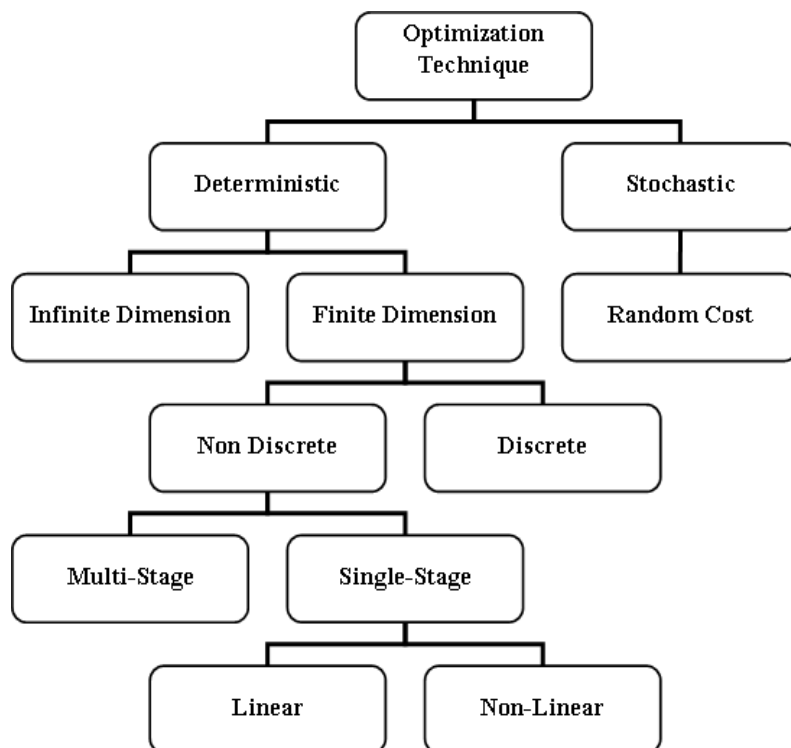
در بهینه‌یابی پیکربندی، با ترکیبی از موارد فوق که در برگیرنده هر سه مورد توپولوژی، مقطع و هندسه است، مواجه شده و بهینه‌یابی آن مد نظر قرار می‌گیرد. در این پایان‌نامه به بهینه‌یابی سطح مقطع و هندسه سازه‌های فضاکار تخت دو لایه با اعمال قیود تنش، کمانش و تغییرمکان پرداخته شده است. تا قبل از رشد و توسعه روش‌های بهینه‌یابی تکاملی دو نوع فرمول‌بندی مطرح می‌گردید. دسته اول بهینه‌یابی بر اساس روش‌های قطعی¹ و یا به تعبیر رایج‌تر برنامه‌ریزی ریاضی² است. در این دسته دیدگاه غیراحتمالاتی بر فضای مسئله حاکم است. دسته دوم، بهینه‌یابی مبتنی بر روش‌های تصادفی³ است که از تئوری احتمالات در فرمول‌بندی خود بهره می‌برد.

بر این اساس طبقه‌بندی کلی روش‌های بهینه‌یابی بدون پرداختن جامع به انواع روش‌های تکاملی در شکل (4-1) نشان داده شده است.

¹ . Deterministic

² . Mathematical Programing

³ . Stochastic



شکل (4-1) نمودار روش‌های بهینه‌یابی

پیشینه‌ی روش‌های دسته‌ی اول را می‌توان در روزگار نیوتن، لاگرانژ و کوشی ردیابی کرد. بسط روش‌های بهینه‌سازی حساب دیفرانسیل با مطالعات نیوتن و لایبنیز¹ عملی شد. حساب تغییرات توسط برنولی، اولر، لاگرانژ و ویرشتراس² بنیانگذاری شد. روش افزودن مضارب مجهول، در بهینه‌سازی مسائل مقید به نام مبتکر آن یعنی لاگرانژ نام‌گذاری شد و روش تندترین کاهش³ در حل مسائل کمینه‌سازی نامقید، برای اولین بار توسط کوشی به کار گرفته شد. علی‌رغم نقش پر رنگ این دانشمندان، تا ابتدای قرن بیستم، پیشرفت چشم‌گیری در این زمینه رخ نداد تا اینکه با ظهور رایانه‌های پرسرعت، به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی و تحقیق در این زمینه، رشد قابل توجهی پیدا کرد.

¹. Leibnitz

². Weirstrass

³. Steepest descent

1-2-1 روش‌های بهینه‌یابی کلاسیک و نوین

از سال 1940 تاکنون روش‌های بهینه‌سازی متعددی مطرح شده است که به عنوان روش‌های کلاسیک شناخته می‌شوند. مهمترین آن‌ها عبارت است از:

1. برنامه ریزی خطی¹
2. برنامه ریزی غیر خطی²
3. برنامه ریزی پویا³
4. روش اکتشافی⁴
5. روش صف⁵
6. روش جایگزینی⁶
7. روش زمان بندی⁷ و ⁿ

شکل (1-5) روش‌های پایه کلاسیک و روش‌های جدید را به صورت طبقه بندی نشان می‌دهد .

¹ . Linear Programming

² . Non Linear Programming

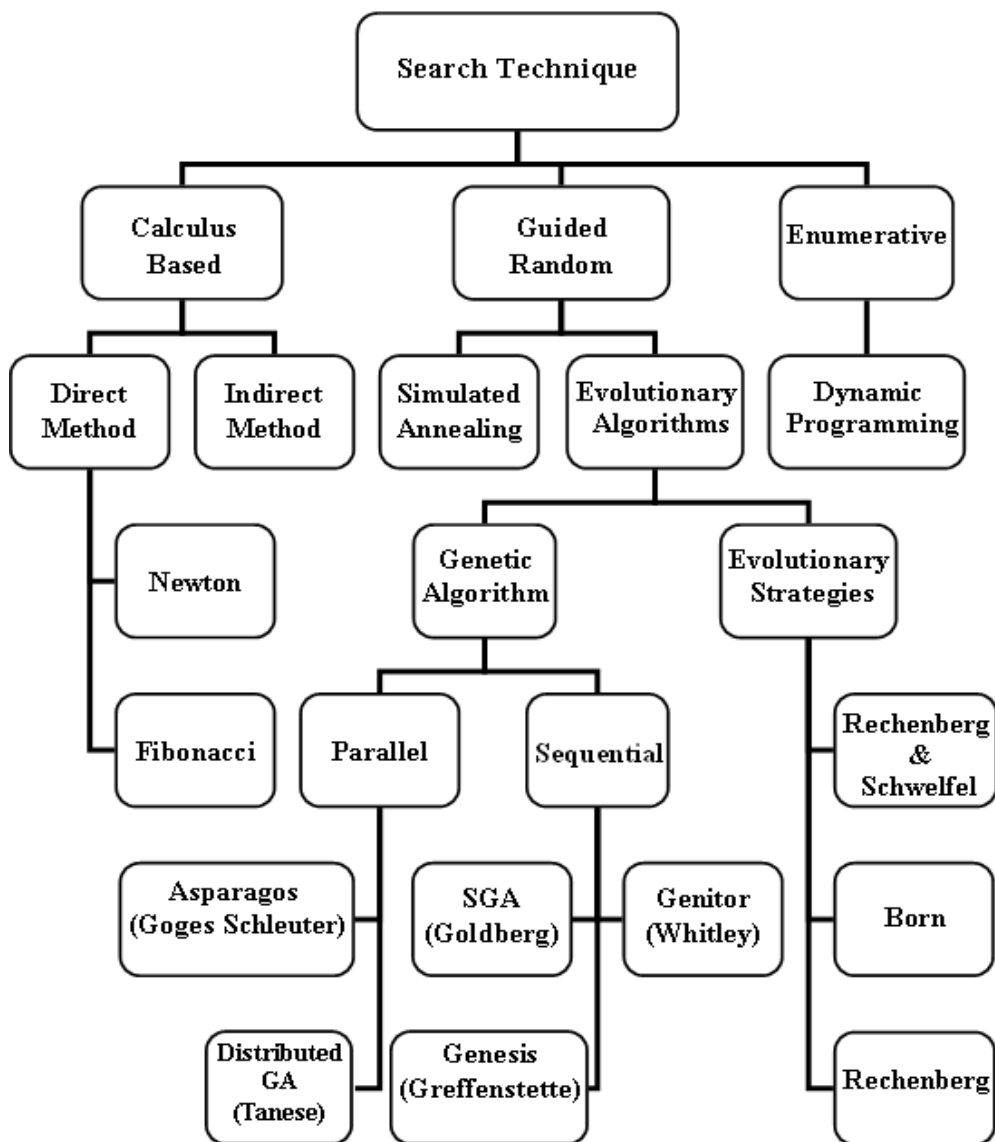
³ . Dynamic Programming

⁴ . Inventory

⁵ . Queuing

⁶ . Replacement

⁷ . Scheduling



شکل (1-5) - نمودار روش‌های کلاسیک و نوین بهینه‌یابی

در هر صورت ، در میان فنون متعدد بهینه‌سازی ، اکثر آن‌ها برای حرکت به سمت نقطه کمینه بشرح زیر عمل می‌نمایند:

1. انتخاب نقطه یا نقاط شروع و شناسایی مجموعه قیود.
2. محاسبه تابع هدف و مجموعه قیود و در برخی از روش‌ها شناسایی جهت جستجو برای یافتن نقطه یا نقاط جدید.
3. بررسی شرط خاتمه برای انجام حرکت بعدی

در چهار دهه گذشته، الگوریتم‌های زیادی برای حل مسائل بهینه‌سازی ارائه شده است. اغلب این الگوریتم‌ها بر اساس روش‌های برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی بوده که نیازمند اطلاعات جامع و ریاضیات قوی می‌باشد. در گذر فرآیندهای بهینه‌سازی، افراد متعددی برای گریز از روابط سنگین ریاضی و به دلایل مختلف دیگر، به روش‌های نوین بهینه‌سازی روی آوردند. امروزه روش‌های نوین بهینه‌سازی که بر پایه الهام از فرآیندهای طبیعی بنا نهاده شده است، در حل بسیاری از مسائل مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند که عمده‌ترین آن‌ها عبارتند از:

1. الگوریتم مورچگان¹
2. الگوریتم ژنتیک²
3. شبکه عصبی مصنوعی³
4. الگوریتم حرکت پرندگان⁴

الگوریتم مورچگان: مورچه‌ها در مسیرهای عبوری خود ماده شیمیایی بجا می‌گذارند که بوسیله این ماده، مورچه‌ها هنگام پیدا کردن مواد غذایی دیگر هم‌نوعان خود را با خبر می‌سازند. مورچه‌هایی که مسیر منتهی به ماده غذایی را طی می‌کنند هم از خود ماده شیمیایی را بجا می‌گذارند. مسیر کوتاه منجر به دوام بوی ماده شیمیایی می‌شود و سبب جذب سایر مورچه‌ها در طی کوتاهترین مسیر می‌شود. الگوریتم کلونی مورچه اولین بار توسط دوریگو⁵ و همکارانش برای حل مسائل مشکل بهینه‌سازی مثل فروشنده دوره‌گرد ارائه گردید.

¹ . Ant Colony Optimization

² . Genetic Algorithm (GA)

³ . Artificial Neural Network (ANN)

⁴ .Particle Swarm Optimization (PSO)

⁵ .Dorigo

شبکه عصبی مصنوعی : شبکه‌های عصبی اطلاعات را به روشی مشابه با کاری که مغز انسان انجام می‌دهد پردازش می‌کنند. آن‌ها از تعداد زیادی از عناصر پردازشی (سلول عصبی) که فوق‌العاده بهم پیوسته‌اند تشکیل شده‌است که این عناصر به صورت موازی با هم برای حل یک مسئله مشخص کار می‌کنند. شبکه‌های عصبی با مثال کار می‌کنند و نمی‌توان آن‌ها را برای انجام یک وظیفه خاص برنامه‌ریزی کرد مثال‌ها می‌بایست با دقت انتخاب شوند در غیر این صورت زمان سودمند، تلف می‌شود و یا حتی شبکه ممکن است نادرست کار کند. امتیاز شبکه عصبی این است که خودش کشف می‌کند که چگونه مسئله را حل کند ، عملکرد آن غیر قابل پیش‌گویی است.

الگوریتم حرکت پرندگان : اساس کار بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند.

در مورد الگوریتم ژنتیک در فصل آتی به تفصیل بحث خواهد شد .

3-1 بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار

هر سیستمی هنگام طراحی و ساخت نیازمند آن است که کلیه اجزای تشکیل دهنده آن مورد بازبینی قرار گیرد تا موجب بهبود عملکرد اجزا و در نتیجه بهینه‌سازی مجموعه و به تبع آن افزایش بازده و صرفه‌جویی اقتصادی گردد. سازه‌های فضاکار نیز بعنوان پرکاربردترین و مهم‌ترین نوع سازه‌های مورد استفاده در پوشش مکان‌های وسیع، دارای محدودیت‌ها، نقاط ضعف فراوان و عدم شناخت کامل سازه‌ای می‌باشد، که کمتر بدان پرداخته شده است و اغلب مهندسان از نحوه‌ی عملکرد و شیوه طراحی آن بی‌اطلاع‌اند و به این سبب در اکثر موارد، طراحی‌ها با ضرائب ایمنی بسیار بزرگ و غیر قابل توجیه انجام می‌پذیرد .

از سازه‌های فضاکار جهت پوشش دهانه‌های بسیار بزرگ استفاده می‌گردد که از جمله کاربردهای آن می‌توان به ساختمان‌های صنعتی، آشیانه هواپیماها، ورزشگاه‌های سرپوشیده، استخرها، سالن‌های انبار کالا و... نام برد. در این میان سازه‌های فضاکار تخت بدلیل کاربرد روزافزون و سهولت در اجرا، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است .

بر روی سازه‌های فضاکار در چند ساله اخیر کارهای فراوانی از نظر ساخت و تولید به انجام رسیده است . اما عدم پشتوانه علمی، نقاط مجهول در محاسبات و طراحی، و همچنین عدم اجرای درست، اینگونه سازه‌ها، تحقیقات بیشتری را در این زمینه می‌طلبد. همچنین ترویج پیدا کردن استفاده از ضرایب دست بالای اطمینان (که به حق به گفته استاد احمد حامی ، پدر مهندسی عمران ایران، ضریب جهل) برای جلوگیری از شکست‌های سازه‌ای در طول بهره‌برداری از ساختمان، موجب غیر اقتصادی گشتن استفاده از این سیستم‌های سازه‌ای در ایران شده است .

از طرفی باید خاطر نشان شد که یکی از مهمترین دغدغه‌ها در امر طراحی این سیستم سازه‌ای فقدان آئین‌نامه‌ای معتبر است که به صورت خاص به این نوع از سازه‌ها بپردازد، می‌باشد.

در بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار بر اساس GA، دو گام اساسی مورد توجه قرار می‌گیرد. تحلیل سازه به منظور بدست آوردن پاسخ‌های سازه‌ای و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک توزیعی (جزیره‌ای) جهت تعیین هندسه و سطح مقطع، نزدیک به سازه بهینه

1-5 اهداف تحقیق

هدف از انجام این تحقیق ارائه برنامه‌ی کامپیوتری مطلوب برای کاربران است که بتوانند به طراحی بهینه وزنی و هندسی سازه‌های فضاکار تخت دو لایه که از جمله پرکاربردترین سازه‌های مورد استفاده در صنعت امروزی است، بپردازند. این برنامه بر اساس فرض رایج در ساخت این گونه

از سازه‌ها که همان خرپایی بودن سازه (یعنی رفتار اعضای میله‌ای در کشش یا فشار هستند) نوشته شده است.

فرضیات اساسی که در برنامه لحاظ شده است به شرح ذیل می باشد:

- ✓ از مقطع لوله‌ای شکل برای اعضای سازه فضاکار استفاده شده است. بنابراین هر عضو دارای دو مشخصه است که عبارت اند از: قطر مقطع و ضخامت مقطع. که برای عملی بودن طرح از لوله‌های موجود در جدول اشتال استفاده شده است.
- ✓ جهت تحلیل از تئوری ماتریسی با فرض رفتار ارتجاعی مصالح استفاده شده است.
- ✓ بارهای موثر ثقلی (مرده و برف) و به صورت استاتیکی اثر می کنند.
- ✓ قید های جهت طراحی و کنترل سازه عبارت اند از: قیود تغییر مکان‌های گرهی سازه، تنش مجاز فشاری و تنش مجاز کششی اعضا ، محدودیت‌های لاغری اعضا و قید کمانش موضعی که بر اساس آئین نامه فولاد ایران می باشد.

6-1 ساختار پایان نامه

این تحقیق در شش فصل به شرح ذیل تنظیم شده است:

در فصل یک به بیان مقدمه‌ای از علم بهینه سازی، تاریخچه‌ی بهینه سازی سازه‌های فضاکار و همچنین خلاصه‌ای از اهداف و مفروضات پرداخته شده است.

در فصل دوم به شرح عملکرد الگوریتم ژنتیک توزیعی (جزیره‌ای) و پارامترهای مرتبط با آن، برای حل مسائل بهینه سازی پرداخته شده است.

در فصل سوم به توضیح ساختار و ضوابط سازه‌های فضاکار پرداخته شده است.

در فصل چهارم فرمول نویسی مساله بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار در الگوریتم ژنتیک بیان شده است.

در فصل پنجم فرضیات و راهنمای استفاده از برنامه بهینه‌سازی هندسه و سطح مقطع سازه‌های فضاکار تخت دو لایه تشریح شده است.

در فصل ششم مثال‌هایی جهت صحت سنجی برنامه نوشته شده ارائه شده است.

در فصل هفتم نتایج حاصل و پیشنهاداتی جهت تحقیقات بعدی ارائه شده است. و در انتها فهرست مراجع ذکر گردیده است.

فصل دوم:

معاہدہ ماکدوریتہ تمزیک

2-1 مقدمه

طی سه دهه‌ی اخیر روش‌های برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی متعددی جهت بهینه‌سازی مسائل گسترش پیدا کرده است، هرچند روش واحدی که بتواند تمامی مسائل بهینه‌سازی مهندسی را به صورت دقیق و موثر حل نماید معرفی نگشته است. جهت بهینه‌سازی سازه‌های بزرگ، روش‌های سنتی به علت وجود محاسبات پیچیده گرادیان تا حدی ناکارآمد است [5]. برای فرار از این مشکلات روش‌های کلاسیک، الگوریتم ژنتیک در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. الگوریتم ژنتیک را می‌توان به طور ساده، یک روش جستجوگر تکاملی مؤثر در فضاهای طراحی بسیار بزرگ دانست که بر پایه مشاهدات صفات و قابلیت‌های فرزندان بر اساس اصل بقای بهترین¹ پایه‌ریزی شده است و از قوانین تکامل بیولوژیکی طبیعی تبعیت می‌کند الگوریتم ژنتیک در طی نسل‌سازی‌ها به کمک فرایند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولید مثل فرزندان، به سمت جواب بهینه حرکت می‌کند. هرچند بر اساس اصول تمامی الگوریتم‌های تکاملی، بهینه‌ی مطلق در زمان بی‌نهایت بدست می‌آید، اما می‌توان انتظار داشت در زمان محدود با تعداد مشخصی از نسل‌ها به یک بهینه‌ی نسبی مناسب دسترسی پیدا کرد که تقریب مناسبی از یک جواب بهینه مطلق باشد.

1. principle of survival of the fittest

الگوریتم‌های ژنتیک تفاوت‌های زیادی با روش‌های بهینه‌سازی قدیمی دارند. در این الگوریتم‌ها باید فضای طراحی به فضای ژنتیک¹ تبدیل شود؛ لذا می‌بایست متغیرهای طراحی بصورت کد مطرح گردند، تا بیانگر طرح مورد نظر در فضای طراحی و فضای ژنتیک باشند. تفاوت اصلی الگوریتم ژنتیک با روش‌های قدیمی در آن است که GA در یک لحظه خاص با مجموعه‌ای از نقاط کار می‌کند، در حالی که روش‌های قدیمی بهینه‌سازی تنها با یک نقطه خاص عمل می‌نمایند. به عبارت دیگر، GA در هر تکرار و نسل مجموعه‌ای از طرح‌های ممکن را مورد پردازش قرار می‌دهد [8].

خاصیت مهم الگوریتم ژنتیک، مقاوم بودن آن است، به طوری که در آن یک تعادل انعطاف‌پذیر، بین کارایی و خصوصیات لازم برای بقا در محیط‌ها و شرایط گوناگون وجود دارد. بطور کلی هر چه یک سیستم مصنوعی از نظر مقاومت در درجه بالاتری باشد، هزینه طراحی مجدد آن کاهش یافته و حتی حذف می‌گردد. در واقع چنانچه میزان سازگاری سیستمی افزایش یابد، آن سیستم قادر خواهد بود که به مدت طولانی‌تر و به نحو مطلوب‌تری به کار پردازد. در سیستم‌های بیولوژیک میزان انعطاف‌پذیری، مقاومت و کارایی به شکل شگفت‌انگیزی زیاد است. سازگاری، بقا، خودترمیمی، هدایت و تولید مثل از دیگر ویژگی‌های خاص سیستم‌های طبیعی و بیولوژیک می‌باشد که مهندسان در صدند تا در سیستم‌های مصنوعی از آنها تقلید کنند. اما بطور کلی جایی که کارکرد مقاوم مورد نیاز باشد، طبیعت بهتر عمل خواهد کرد.

2-2 تاریخچه الگوریتم ژنتیک

در دهه نود قرن نوزدهم، تحقیقات دو تن از پیشگامان علم ژنتیک، وجود نوعی دستور یا کد وراثتی را بر همگان اثبات کرد. چارلز داروین² در سال 1859 نظریه تکاملی خود را مطرح کرد و

¹. Genetic Space

². Charles Darwin

گرگور مندل¹ در سال 1865 موفق شد قوانین اساسی وراثت را کشف کند، اما هیچ‌یک از آن‌ها نتوانستند دریابند که چه عاملی باعث کنترل و هدایت سیستم‌های مورد مطالعه می‌شود. تنها دلیلی که به نظر می‌رسید، این بود که عامل هدایت‌کننده جایی در درون گیاهان یا حیوانات پنهان است. داروین در تحقیقاتش تحت تاثیر تغییرات درون گونه‌ها قرار گرفته بود. او متوجه شده بود که تقریباً در تمامی ارگانیزم‌ها تمایل زیادی برای ایجاد فرزند وجود دارد ولی درصد کمی از آنها توانایی رسیدن به بزرگسالی را دارند. او همچنین دریافته بود که در داخل یک جمعیت نیز تنوع زیادی وجود دارد [9].

وی نتیجه گرفت تغییراتی که فرد را در تنازع بقا یاری می‌رساند، شانس بیشتری برای ماندن در یک گونه را سبب می‌شود. با فرض اینکه تغییرات در فرد به وسیله توارث به فرزندان برسد، داروین تکامل را انتخاب طبیعی از تغییرات موروثی در نظر گرفت [9].

مندل نیز نتایجی در مورد اثر متقابل خصوصیات به دست آورد، به عنوان مثال وقتی که گیاهان بلند را با کوتاه ترکیب کرد، بدون توجه به اینکه کدام یک گرده را اهدا کرده است، متوجه شد تمام فرزندان بلند می‌شوند؛ مندل نتیجه گرفت که خاصیت گیاه بلند (یا همان ژن که بعدها شناخته شد) پیروز شده و خاصیت گیاه کوتاه، کنار گذاشته شده است [9].

هر چند که تئوری داروین تغییرات پیوسته در داخل گونه‌ها را تایید کرد، تغییرات ناپیوسته در گونه‌ها به صورت یک سوال باقی ماند. مشاهده شد که در جمعیتی از گیاهان، بعضی اوقات تغییرات عمده‌ای ظاهر می‌شود که برای توضیح این تغییرات ناپیوسته، دوریس تئوری جهش را مطرح کرد. با روشن شدن ساختمان ژن‌ها، مشخص شد که تاثیرات جهش چقدر ظریف است.

³. Gregor Mendel

اگر یک خصوصیت، با یک ژن مشخص شود، جهش تاثیر زیادی خواهد داشت. اما اگر یک مجموعه از ژن‌ها ترکیب شوند تا خواصی را کنترل کنند، تاثیر جهش یک ژن ممکن است اثر چندانی نداشته باشد. در هر صورت، باید این نکته را در نظر داشت که قانون انتخاب، بدون تغییر باقی می‌ماند.

در سال 1950 تورینگ¹ ادعا کرد که با پایان یافتن قرن و ظهور رایانه‌های جدید، یک رایانه باید قادر به انجام تست هوش استاندارد باشد [۹]. امروزه پیگیری روند توسعه چنین ماشین‌های هوشمندی توسط بسیاری از محققان، هدف اصلی سیستم‌های تطبیقی² است. سیستم‌های تطبیقی در حوزه محاسبات، متشکل از یک سری تکنیک‌های عددی است در صورتی که به یک مسئله به صورت خودکار و مستقل اعمال می‌شود، اهمیت نسبی هر یک از پارامترهای ورودی را برای حل مسئله تنظیم می‌کند.

اگرچه این سیستم‌ها قابلیت تنظیم و میزان شدن³ برای مجموعه‌ای از مسائل ویژه را دارا می‌باشد، البته باید توجه داشت که در نتایج آن‌ها، یک مجموعه جواب مناسب مد نظر خواهد بود. بنابر این، به جای داشتن یک جواب یکتا مجموعه‌ای از پاسخ‌های مطلوب در اختیار طراح قرار می‌گیرد که در این صورت، امکان بررسی سایر شرایط جانبی حاکم بر مسئله بر پاسخ نهایی سیستم وجود خواهد داشت این قابلیت که به استراتژی بهترین مجموعه جواب مشهور است، بیشتر شامل مسائل غیر خطی خواهد شد.

حوزه سیستم‌های تطبیقی، شامل دو شاخه اصلی به نام هوش مصنوعی و سیستم‌های تکاملی⁴ است. در حوزه هوش مصنوعی به طور مثال شبکه عصبی شناخته شده‌ترین سیستم در کاربرد عملی این نوع روش بهینه‌سازی می‌باشد.

¹. Turing

². Adaptive Systems

³. Tuning

⁴. Evolutionary Systems

همانطور که گفته شد یک شاخه اصلی از سیستم‌های تطبیقی، سیستم‌های تکاملی است که گاهی از آن به یک « حیات مصنوعی » تعبیر می‌شود. واژه تکاملی، استعاره از یک سیستم رایانه-مبنا¹ است که بر اساس رویکرد « داروینیسیم » یعنی « قانون بقای بهترین² » به حل مسائل می‌پردازد به بیان ساده، سیستم‌های تکاملی رایانه-مبنا، یک رقابت قانونمند میان راه‌حل‌های موجود در محیط مسئله است.

تناسب و برازش هر عنصر از محیط بر مبنای ارزش نسبی آن که با توجه به تابع هدف مسئله است تعیین می‌شود. جذابیت این سیستم، به عنوان یک استراتژی حل مسئله، در توانایی طبیعت در یافتن راه‌حل‌های متفاوت برای مسائل دینامیکی و پیچیده است. بنابراین اگر تکامل به عنوان یک الگوریتم حل مسئله مورد توجه قرار گیرد، می‌تواند از میان راه‌حل‌های مختلف موجود برای یک مسئله، راه‌حل بهینه را اختیار نماید. این امکان بدین صورت فراهم می‌شود که بر اساس تکامل، خصوصیات و روابط تازه‌ای به وجود خواهد آمد که بر همین اساس، احتمال فراهم آمدن یک حل بهینه در میان راه‌حل‌های جدیدتر را افزایش خواهد داد.

ایده اصلی الگوریتم‌های تکاملی در سال 1960 توسط ریچنبرگ³ مطرح شد که تحقیق وی در مورد استراتژی‌های تکاملی⁴ بود [10]. بعدها نظریه وی توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفت تا منجر به طرح الگوریتم ژنتیک شد. الگوریتم‌های ژنتیک در حقیقت، روش جستجوی کامپیوتری بر پایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی و بر اساس ساختار ژن⁵ ها و کروموزوم⁶ ها است این نظریه، اولین بار توسط جان هالند⁷ در سال 1975 در دانشگاه میشیگان به صورت فرمول‌بندی ریاضی و در مقاله خود

¹. Computer Based

². Survival Of the Fittest

³. Rechenberg

⁴. Evolutionary Strategies

⁵. Gene

⁶. Chromosome

⁷. John Holland

تحت عنوان « انطباق در سیستم‌های طبیعی و مصنوعی¹ » ارائه گردید و چگونگی انتخاب در سیستم‌های طبیعت‌شریح شد. پس از وی این نظریه توسط جمعی از دانشجویانش مثل گلدبرگ² و آن آربر³ توسعه یافت.

در سال 1992 جان کوزا⁴ از الگوریتم ژنتیک برای حل و بهینه سازی مسائل مهندسی پیشرفته استفاده کرد و توانست برای اولین بار روند الگوریتم ژنتیک را به زبان کامپیوتر درآورد و برای آن یک زبان برنامه نویسی ابداع کند که این روش برنامه نویسی را برنامه نویسی ژنتیک⁵ نامید .

نرم افزاری که توسط وی ابداع گردید به نرم افزار LISP مشهور است که هم اکنون نیز کاربرد فراوانی در حل و بهینه سازی مسائل مهندسی دارد [11]. از آن پس تا به امروز کتاب‌های متعددی توسط افرادی چون گلدبرگ ، دب⁶ و جنکینز⁷ به رشته تحریر در آمده است و پس از آن بسیاری از محققین مقالات متنوعی درباره ، بسط دامنه کاربرد GA ، بهبود نتایج و افزایش سرعت محاسبات، ارائه نموده‌اند. این الگوریتم امروزه به دلیل کاربرد فراوان، از جایگاه ویژه ای در میان روش های بهینه سازی برخوردار است [8].

2-3 مبانی علم ژنتیک و مفاهیم آن

بررسی چگونگی انتقال صفات از والدین به فرزندان موضوع علم ژنتیک است، اگرچه اکثر مردم ژنتیک را با خواص توارث می شناسند اما امروزه ژنتیک از این محدوده فراتر رفته و تمام فرایندهای زیستی موجودات نظیر تولید مثل، جهش، تکامل، مهاجرت، پاسخ به محرک و... را در بر می‌گیرد. در

¹. Adaptation in Natural and Artificial systems

². Goldberg

³. Ann Arbor

⁴. John Koza

⁵. Genetic Programming (GP)

⁶. Deb

⁷. Jenkins

ژنتیک، به ویژگی های یک جاندار صفت گفته می شود. به عنوان مثال، رنگ پوست، رنگ چشم و ... جزء صفات هر موجود محسوب می شوند و می تواند در موجودات متفاوت باشند.

در راستای فهم کامل الگوریتم ژنتیک، ابتدا بهتر است با برخی از اصطلاحات زیستی به کار رفته در این تئوری آشنا شویم. بدن همه موجودات زنده از سلول تشکیل شده است. در هر سلول مجموعه ای از کروموزوم ها به شکل رشته ای به نام DNA وجود دارند. به هر بلوک DNA یک ژن گویند و هر ژن نیز از یک پروتئین خاص و منحصر به فرد تشکیل شده است. هر ژن یک الگوی خاص را رمزگشایی¹ می کند. به عبارت دیگر هر ژن یک صفت² را مشخص می نماید. مجموعه ای از این صفات ها آلل³ نامیده می شود. از سوی دیگر هر ژن دارای موقعیت مشخص در کروموزوم است که به این موقعیت لوکاس⁴ می گویند. به کل محتوای ژنتیکی یک جاندار و یا ماده ژنتیکی ژنوم⁵ نامیده شده و هر مجموعه خاصی از ژن ها را در ژنوم، ژنوتیپ⁶ می نامند. این ژنوتیپ اساس فنوتیپ⁷ بوده و ویژگی های ظاهری، فیزیکی و فکری مثل رنگ چشم و هوش و ... را بوجود می آورد.

در یک نگاه کلی اصطلاحاتی که از مباحث زیست شناسی به مبحث الگوریتم ژنتیک وارد شده

است را می توان به شرح زیر دسته بندی نمود :

¹ . Decode

² . Trait

³ . Alleles

⁴ . Locus

⁵ . Genome

⁶ . Genotype

⁷ . Phenotype

1- تولید مثل¹ که به تولید کروموزوم‌های جدید با ویژگی‌های والدین خود، منجر می‌شود. وجود ال‌های مختلف در یک جمعیت تعیین کننده تنوع ژنتیکی آن جمعیت است در نتیجه موجودات در فرایند تولید مثل، فرزندان را با تنوع ژنتیکی جدید تولید می‌نمایند .

2- جهش² که سبب ایجاد تغییرات ناگهانی در DNA می‌شود . این فرایند خود به چند زیر شاخه تقسیم می‌شود که عبارت اند از: جهش بدنی و زایا، جهش های کروموزومی، مضاعف شدن، حذف، جابجایی، و جهش‌های نقطه‌ای.

3 - مناسب بودن³ که برای یک موجود زنده میزان شایستگی آن در ادامه حیات است، به عبارت دیگر برابر است با صفتی که توسط الل به وجود آمده و باعث زنده بودن، سازگاری، توانایی و تولید مثل فرد گردد.

2-3-1 الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک بر روی یک سری از جواب‌های مسئله، به امید بدست آوردن جواب‌های بهتر جستجو می‌نماید. به گونه‌ای که دست‌یابی به تقریب‌هایی بهتر از جواب‌های نهایی و در نتیجه سازگاری بالاتر نتایج با شرایط محیطی را حاصل گردد. این روش هوشمند بطور موفقیت‌آمیزی طرح بهینه عمومی⁴ را بدون در نظر گرفتن فرضیات محدود کننده‌ای از قبیل پیوسته بودن فضای جستجو و یا وجود مشتقات پیدا می‌کند. فرآیند GA بر روی متغیرهای طراحی رمز شده که رشته‌ای از کاراکترها با طول محدود هستند، انجام می‌گیرد. مزیت کار با متغیرهای کد شده در این است که اصولاً کدها قابلیت تبدیل فضای پیوسته به فضای گسسته را دارند [13]. الگوریتم GA در ابتدا با مجموعه‌ای از

¹ . Cross Over

² . Mutation

³ . Fitness

⁴ . Global Optimum

جواب‌های تصادفی (کروموزوم‌ها) که به آن جمعیت¹ گفته می‌شود، آغاز می‌گردد. از این جواب‌ها برای ساخت جمعیت بعدی استفاده می‌شود، به این امید که جمعیت‌های جدید بهتر از جمعیت‌های قدیم باشند. زیرا روش‌هایی که برای انتخاب جمعیت جدید استفاده شده با توجه به مناسب بودن آن‌ها صورت گرفته است. این رقابت میان ژن‌ها و پیروز شدن ژن غالب (ژن انتخاب شده توسط الگوریتم برای تولید مثل در نسل بعدی) و کنار رفتن ژن‌های مغلوب (ژن‌هایی که برازش نامتناسبی با هدف مساله دارند) روش کار آمدمی را برای حل مسائل پیچیده و چندین متغیره، فراهم می‌آورد.

به صورت کلی در بهینه‌یابی توسط الگوریتم ژنتیک چهار مرحله اساسی انجام می‌پذیرد [8]:

تولید تصادفی مجموعه‌ای از طرح‌ها، که بدان جمعیت اولیه گفته می‌شود. هر عضو این جمعیت یک کروموزوم می‌باشد که بصورت کد² بوده و رشته³ نامیده می‌شود. هر رشته متناسب با تعداد متغیرهای طراحی، به چندین زیر رشته⁴ تقسیم می‌شود. زیر رشته مجموعه‌ای از بیت‌ها⁵ می‌باشد که بصورت زنجیر در کنار هم چیده شده‌اند. هر بیت هم‌ارز با یک ژن در الفبای ژنتیک می‌باشد. تعداد بیت‌های هر زیررشته به نحوی تعیین می‌شوند تا بتوان کلیه اطلاعات متغیرهای طراحی را مابین حدود بالا و پایین در مرحله رمزگشایی بدست آورد. با رمزگشایی، مقدار متغیرهای طراحی در هر رشته ارزیابی و مقادیر تابع هدف تعیین می‌گردد.

مسئله بهینه‌یابی مقید با تعریف مجموعه‌ای از توابع پنالتی⁶ و ترکیب آن‌ها با تابع هدف و ایجاد تابع هدف اصلاح شده⁷، به یک مسئله بهینه‌یابی نامقید تبدیل می‌شود. در ادامه با تعریف تابع

¹ . Population

² . Code

³ . String

⁴ . Substring

⁵ . Bite

⁶ . Penalty Function

⁷ . Modified Objective Function

شایستگی، به هر کروموزوم، یک مقدار شایستگی و برازندگی اختصاص داده خواهد شد و سپس با الهام از قوانین تکامل تدریجی طبیعی و روش‌هایی که در ادامه بدان پرداخته خواهد شد، بهترین کروموزوم‌ها بر مبنای میزان شایستگی انتخاب می‌شوند.

در این مرحله، جمعیت جدیدی بر مبنای عملگرهای الگوریتم ژنتیک که در ادامه به شرح تفصیلی آن پرداخته خواهد شد، تشکیل می‌شود. پس از آن جمعیت فرزندان¹ برای نسل² بعد به کار گرفته می‌شود. این مراحل تا ارضای شرط خاتمه الگوریتم و یا به تعداد نسل‌های پیش‌بینی شده توسط کاربر برای کسب بهینه عمومی تکرار می‌شود.

2-3-2 افراد³ یا کروموزوم⁴

هرکدام از افراد جمعیت، که تقریب‌هایی از جواب نهایی باشند، باید به صورت رشته‌ای از اعداد و یا حروف کدگذاری گردند که در اصطلاح به این رشته‌های حامل خواص و پارامترهای تصمیم‌گیری آن موجود، کروموزوم گویند و به مجموعه‌ای از این کروموزوم‌ها که به صورت معمول در حدود 30 الی 100 فرد است جمعیت⁵ گفته می‌شود.

2-3-3 کدگذاری⁶ کروموزوم

در حل مسائل بهینه‌سازی روش‌های متنوعی جهت نمایش پارامترها و اطلاعات مسئله (کروموزوم‌ها) به کار برده شده است که انتخاب هرکدام از این روش‌ها باید با توجه به نوع مساله و فضای جستجوی مورد نیاز برای حل مساله بهینه‌سازی صورت پذیرد. به طور مثال می‌توان سیستم

¹. Offspring

². Generation

³. Individual

⁴. Chromosome

⁵. Population

⁶. Encoding

کدگذاری به صورت رشته‌ای، آرایه¹، درخت² یا لیست³، مقداری یا ارزشی⁴، جایگشتی⁵ صورت گیرد. در این روش‌های کدگذاری می‌توان از اعداد یا حروف استفاده کرد. معمول‌ترین روش در کدگذاری عددی، کدگذاری باینری (دو دویی) می‌باشد [9]. اما در هر صورت، یک سیستم کدگذاری خوب باید دارای خواص زیر باشد [11]:

- 1- تبدیل بین عناصر گذشته و گذشته، یک تبدیل یک به یک باشد.
- 2- کروموزوم‌هایی که هم ارز با هیچ متغیر طراحی نیستند، قابل ترمیم باشند.
- 3- هر نقطه در فضای طراحی قابل تبدیل به یک کروموزوم باشد.
- 4- خواص خوب والدین قابل انتقال به فرزندان باشد.
- 5- تغییر اندک در متغیرهای گذشته باعث ایجاد تغییرات کوچک در متغیرهای گذشته نشود.

2-3-3-1 روش کدگذاری جایگشتی

این نوع کدگذاری می‌تواند در مسائل ترتیبی نظیر مساله فروشنده دوره‌گرد یا مساله ترتیب کارها بکار رود. در کدگذاری جایگشتی، هر کروموزوم یک رشته از اعداد طبیعی می‌باشد، که هر کدام از این اعداد، مربوط به پارامتر ویژه‌ای در فضای حل مساله است. شکل زیر نمونه‌ای از این نوع کدگذاری را نشان می‌دهد. (شکل 2-1)

کروموزوم A	۱ ۵ ۳ ۲ ۶ ۴ ۷ ۹ ۸
کروموزوم B	۸ ۵ ۶ ۷ ۲ ۳ ۱ ۴ ۹

شکل 2-1 کدگذاری جایگشتی

¹.Array

².Tree

³.List

⁴.value

⁵.Permutation

2-3-3-2 روش کدگذاری مقداری

این نوع کدگذاری در مسائلی که در آنها مقادیر پیچیده نظیر اعداد حقیقی به کار می‌روند استفاده می‌شود. استفاده از کدگذاری باینری برای چنین مسائلی بسیار سخت می‌باشد. در کدگذاری ارزشی هر ژن ارزش خاصی دارد. این پارامترهای با ارزش می‌توانند اعداد حقیقی، عبارات منطقی، دستورات جهت‌یابی، داده‌های کد شده به صورت رشته‌های حرفی و ... باشند.

در این نوع کدگذاری نیاز به توسعه عملگرهای جابه‌جایی و جهش جدیدی برای مسائل خاص می‌باشد. (شکل 2-2) نمونه‌ای از این سیستم کدگذاری را نشان می‌دهد.

گروموزوم A	۱,۲۳۲۴ ۵,۳۲۴۳ ۰,۴۵۵۶ ۲,۳۲۹۳ ۲,۴۵۴۵
گروموزوم B	ABDJEIFJDHDIERJFDLDFLFEGT
گروموزوم C	(back), (back), (right), (forward), (left)

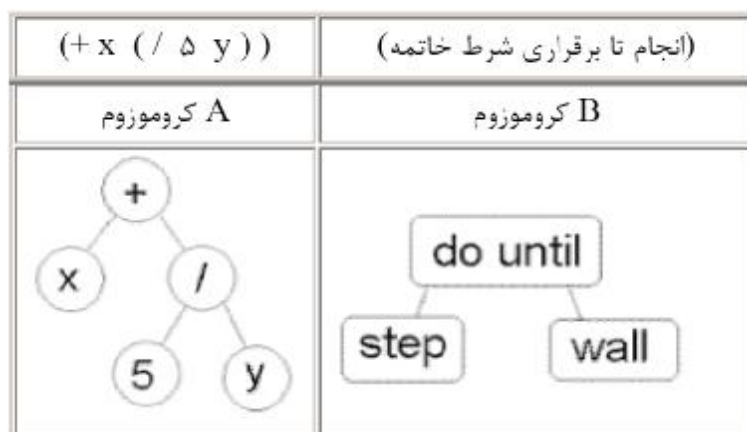
شکل 2-2 کدگذاری مقداری

3-3-3-2 روش کدگذاری درختی

کدگذاری درختی در برنامه‌های تکاملی به منظور برنامه‌ریزی تکاملی بکار می‌رود. در کدگذاری درختی هر کروموزوم یک درخت از اشیائی نظیر توابع یا دستورها در زبان برنامه‌نویسی می‌باشد. شکل زیر دو نمونه از این کروموزوم‌ها را نشان می‌دهد. این نوع کدگذاری برای برنامه‌های تکاملی بسیار عالی است. اغلب از این نوع کدگذاری استفاده می‌کند، بدین علت است که در برنامه¹ LISP به این

¹ .list Processor

فرم نمایش داده می‌شوند و می‌توانند براحتی مورد تجزیه قرار بگیرند [8]. بنابراین عمل تقاطع و جهش نیز به همان نسبت راحت انجام می‌شوند. (شکل 2-3)



شکل 2-3 کدگذاری درختی

2-3-3-4 کدگذاری باینری¹

از آنجایی که این نوع کدگذاری، متداولترین نوع کدگذاری می‌باشد و همچنین از این روش در این پایان‌نامه استفاده شده به شرح این روش می‌پردازیم. در این روش کدگذاری، هر کروموزوم شامل یک رشته از بیت‌های 0 و 1 می‌باشد. کدگذاری باینری می‌تواند حالت‌های زیادی را پوشش دهد، حتی در مواردی که تعداد آل‌ها کم باشد. (شکل 2-4)

کروموزوم A	۱۰۱۱۰۰۱۰۱۱۰۰۱۰۱۰۱۱۱۰۰۱۰۱
کروموزوم B	۱۱۱۱۱۱۱۰۰۰۰۱۱۰۰۰۰۱۱۱۱۱

¹. Binary

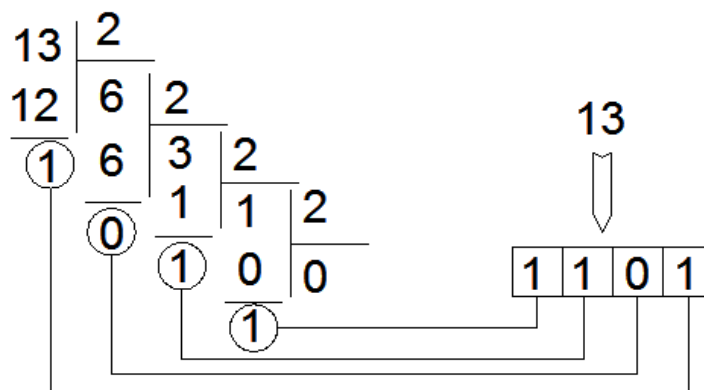
شکل 2-4 کدگذاری باینری را نشان می‌دهد

نخستین گام برای کد کردن پارامترهای تصمیم‌گیری مساله، تعیین طول رشته‌ی آن پارامتر خاص می‌باشد، که این طول به شمار مقدرهای گسسته آن متغیر خاص و سامانه کدگذاری بستگی دارد و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$2^n = N \quad (1-2)$$

که در آن N تعداد متغیرهای طراحی و n طول مورد نیاز رشته است.

به عنوان مثال برای یک مساله خاص که دارای 16 پارامتر است، زیر رشته تعریف شده بایستی 4 بیتی باشد که برای بدست آوردن رشته باینری معادل یک پارامتر مشخص، در ابتدا کد مورد نظر، و در ادامه، خارج قسمت را به طور متوالی بر عدد دو تقسیم می‌نماییم تا رشته معادل تعیین گردد. (شکل 2-5)



شکل (2-5) نحوه‌ی بدست آوردن اعداد در مبنای 2

اما اگر تعداد متغیرهای طراحی توانی از دو نباشد، طول رشته مورد نظر کوچکترین عدد صحیحی می‌باشد که در رابطه ذیل صادق است.

$$2^n > \quad (2-2)$$

N

بنابراین با ادغام رابطه (1-2) با رابطه (2-2) رابطه کلی (3-2) به دست می‌آید. طول رشته مورد نظر کوچکترین عدد صحیحی است که در رابطه ذیل صادق باشد.

$$2^n \geq \quad (3-2)$$

N

رابطه (3-2) را می‌توان به صورت ذیل نیز نشان داد. اگر تعداد متغیرهای طراحی توانی از دو نباشد از رابطه (2-4-الف) در غیر این صورت از رابطه (2-4-ب) استفاده می‌شود.

$$\begin{cases} n = \lceil \log_2 N \rceil + 1 & (2-4-الف) \\ n = \log_2 N & (2-4-ب) \end{cases}$$

در معادله (2-4-الف) علامت [] به معنی جزء صحیح می‌باشد.

طبق رابطه (1-2) با توجه به اینکه یک رشته n بیتی، تعداد N عدد از 0 تا $2^n - 1$ را کد می‌نماید؛ لذا مقدار عددی هر زیررشته A در هنگام رمزگشایی¹ برابر است با [8]:

$$A = \sum_{k=0}^{k=n-1} 2^k$$

هر بیت S می‌تواند اعداد 0 و 1 را اختیار نماید و به صورت رشته زیر نمایش داده می‌شود:

¹.Decoding

(6-2)

$$S_{n-1} \dots S_2 S_1 S_0$$

به عنوان مثال اگر یک رشته 5 بیتی به صورت (10100) نمایش داده شود، مقدار معادل آن برابر است با:

$$2^4 * 1 + 2^3 * 0 + 2^2 * 1 + 2^1 * 0 + 2^0 * 0 = 20$$

دقت شود در بسیاری از مسائل با مقادیر حقیقی پارامترها سروکار داریم. در این نوع مسائل بهتر است یک سری کدهای حقیقی به متغیرهای مساله اختصاص داده شود و در نهایت این کدها در سیستم دودویی شرکت داده شود، این روش به خصوص زمانی که مقادیر اصلی پارامترهای ورودی به طور همگن و یکنواخت نباشد، بسیار کارا تر خواهد بود.

به عنوان مثال برای بهینه‌سازی یک نوع کامپوزیت با الیاف اپوکسی، از کامپوزیت‌های با زوایای الیاف متنوع استفاده می‌شود. زیرا ظرفیت تحمل بار در این ورق‌ها در اثر تفاوت در زاویه الیاف، نسبت به جهت بارگذاری متفاوت است. بنابراین الگوریتم ژنتیک نیازمند جستجو در فضای زاویه‌های موجود برای الیاف بوده تا با ترکیب و لایه‌چینی‌های پی در پی، بهترین حالت ممکن برای چینش و طرز قرارگیری لایه‌ها را در سازه بدست آورد. بدین منظور باید زوایای موجود به شیوه‌ی مناسب کدگذاری شوند، این کدگذاری به طور نمونه در جدول (1-2) نشان داده شده است.

جدول (1-2) تخصیص کدهای حقیقی به مقادیر زوایای الیاف کامپوزیت

زاویه الیاف کامپوزیت	کد پارامتر زاویه	کرموزوم تخصیص داده شده
0	0	000
30	1	001
50	2	010
60	3	011
15-	4	100

اگرچه سیستم دودویی گسترده‌ترین شیوه کدگذاری است اما دارای مشکلاتی نیز می‌باشد که بدان اشاره می‌گردد، نخست آنکه تغییرات کوچک در پارامترها می‌تواند تغییرات بزرگ در رشته را بوجود آورد.

به عنوان نمونه دو عدد (100000) و (011111) به لحاظ مقدار، تنها دارای اختلاف واحد هستند. ولی در حالت کد شده بسیار متفاوت می‌باشند، این اختلاف در هنگام اعمال عملگرهای ژنتیک معمول مشکل آفرین خواهد بود، به بیان دیگر، یک تغییر کوچک در فضای کد شده، مشابه آن تغییر در مقدار حقیقی نیست. مشکل دیگر سیستم‌های دودویی، هنگامی به وجود خواهد آمد که تعداد پارامترهای مساله دقیقاً با توان‌های عدد 2 برابر نباشد؛ به طور مثال در یک مساله خاص (برای مثال عدد 6)، تعداد پارامترهای تولیدی عددی بین 4 و 8 می‌باشد. در این صورت به احتمال زیاد، در طی مراحل مختلف اجرای الگوریتم، مقادیری تولید می‌شود که معادل تعداد پارامتر مربوطه نیست.

برای رفع این مشکل برای رمزگشایی به طریق ذیل عمل می‌کنیم. [۹]

$$A = X^L + \left[\frac{X^U - X^L}{2^n - 1} * \sum_{k=0}^{k=n-1} 2^k * S_K \right] \quad (7 - 2)$$

X^L حد پایین متغیر طراحی

X^U حد بالای متغیر طراحی

n طول رشته مورد نظر

2-3-4 تعیین جمعیت اولیه

بعد از تصمیم‌گیری پیرامون شیوه کدگذاری پارامترهای موجود، جمعیت اولیه برای شروع الگوریتم باید تولید شود، که بنا بر نظر طراح الگوریتم می‌تواند به صورت ذیل باشد:

1- کاملاً تصادفی تولید شوند.

2- به صورت هدایت شونده و با اعمال نظر کاربر، تعیین شود.

3- از یک جمعیت قبلی نگهداری شده استفاده شود.

در صورتی که جمعیت نخستین با اعمال نظر کاربر ایجاد شود ابتدا مقادیر مورد نظر برای هر ژن باید کدگذاری شود تا به کروموزوم تبدیل شود [14].

2-3-5 تابع هدف

روش‌های طراحی معمول، ما را در یافتن یک طرح قابل قبول یاری می‌دهند. این نوع طراحی، تنها نیازمندی‌های عملی و دیگر نیازمندی‌های مسئله را برآورده می‌سازد. اما در اینجا، قابل قبول بودن یک طرح مورد نظر نیست بلکه، هدف از بهینه‌سازی، انتخاب بهترین طرح از میان طراحی‌های قابل قبول موجود می‌باشد بنابراین باید معیاری برای طراحی‌های قابل قبول و انتخاب بهترین آن‌ها تعیین شود. چنین معیاری که طرح نسبت به آن بهینه می‌شود را به صورت تابعی از متغیرهای طراحی بیان می‌کنند و آن را تابع معیار یا تابع هدف می‌نامند. انتخاب تابع هدف به طبیعت مسئله بستگی دارد. در مسائل طراحی سازه‌های هوافضا، معمولاً کمینه‌سازی وزن به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. در طرح‌های مهندسی سازه، تابع هدف، معمولاً کمینه‌سازی هزینه است و در سیستم‌های مکانیکی، هدف بیشینه کردن بازدهی مکانیکی است بنابراین انتخاب تابع هدف در بیشتر

مسائل طراحی ساده به نظر می‌رسد. با این وجود، ممکن است در برخی مواقع، بهینه‌سازی نسبت به یک معیار مشخص، به نتایجی بیانجامد که نسبت به یک معیار دیگر رضایت‌بخش نباشد.

برای مثال در مکانیسم طراحی سازه‌های نامعین استاتیکی، طرحی با داشتن محدوده تنش ایمن، ممکن است دارای کمترین وزن و در نتیجه ارزان‌ترین طرح نباشد. بنابراین انتخاب تابع هدف یکی از مهمترین تصمیمات در کل فرآیند طراحی بهینه است. در بعضی حالات لازم است که بیش از یک معیار طراحی به طور همزمان برآورده شود. به طور مثال در انتقال یک توان مشخص توسط یک جفت چرخ‌دنده، ممکن است چرخ‌دنده‌ها را برای وزن کمینه و بازدهی بیشینه طراحی کنیم.

یک مسئله بهینه‌سازی با توابع هدف چندگانه را به عنوان یک مسئله برنامه ریزی با چند هدف (یا مسئله برنامه‌ریزی آرمانی) می‌شناسند. با هدف‌های چندگانه، امکان پیچیدگی مسئله زیاد می‌شود یک راه ساده برای حل چنین مسائلی این است که تابع هدف را به عنوان ترکیبی خطی از توابع هدف چندگانه پیچیده در نظر گرفت یعنی اگر $f_1(x)$ و $f_2(x)$ دو تابع هدف ممکن باشند برای بهینه‌سازی، تابع هدف جدید به صورت رابطه (8-2) در نظر گرفته خواهد شد.

$$f(x) = \alpha f_1(x) + \beta f_2(x) \quad (8-2)$$

که α و β مقادیر ثابتی هستند که مقادیر آنها بیانگر اهمیت یک تابع هدف، نسبت به دیگری خواهد بود.

2-3-6 تابع جریمه

همانطور که گفته شد در مسائل بهینه‌سازی که هدف آن مینیمم‌سازی است مناسب‌ترین فرد در جمعیت، آن است که تابع هدف کمتری را نسبت به دیگران تولید نماید. اما آنچه در این میان ممکن است باعث تغییر در اهداف فوق شود عدم اغنای کامل شرایط مسئله در مسئله بهینه‌سازی مقید می‌باشد. به صورت مثال در طرح یک سازه بهینه اگرچه طبق تعریف بالا، سازه‌ای که کمترین وزن را تولید نماید، باید بهترین طرح ممکن باشد، اما مسلماً طرح سازه‌ای که دارای ایمنی و پایداری و یا هندسه کامل نباشد مورد نظر نیست و به احتمال بسیار زیاد، طرحی که دارای کمترین وزن باشد دارای نقض قیود آیین نامه‌ای است، نتیجتاً طرح مناسبی به حساب نمی‌آید. جهت جلوگیری از معرفی چنین طرحی به عنوان طرح منتخب باید از تابع پنالتی جهت جریمه طرح‌های ناقض استفاده نمود.

در واقع به واسطه تعریف تصادفی متغیر یا متغیرهای طراحی، به احتمال فراوان قیود مسئله نقض می‌شوند، بنابراین کروموزوم ناقض قیود، جریمه خواهد شد، طبیعی است هر کروموزومی که قیود مسئله را بیشتر نقض نماید، مقدار تابع پنالتی متناظر آن بیشتر است با این شیوه برآزش جواب‌های خارج از محدوده به شدت کم خواهد شد و در نتیجه در فرایند انتخاب از شانس انتخاب کمتری برخوردار می‌شوند.

محققین و دست‌اندرکاران GA، روابط متعددی را برای تابع پنالتی و چگونگی محاسبه مقدار جریمه ارائه نموده‌اند که در ذیل به بررسی تعدادی از آن‌ها بر حسب اهمیت و کاربردشان پرداخته شده است [۸].

1- راجیو و کریشنامورتی¹ تابع پنالتی را بشرح زیر پیشنهاد می‌نمایند [۶].

¹. S.Rajeev & C.S.Krishnamoorthy

$$f_{Penalty} = F(X) * K * C \quad (9-2)$$

$$C = \sum_{q=1}^Q \max[0, g_q(X)] \quad (10-2)$$

در روابط فوق

$f_{Penalty}$: تابع جریمه

$F(X)$: تابع هدف

X : بردار متغیر طراحی

$g_q(X)$: میزان نقض سازه در ارتباط با هر یک از قیود

Q : تعداد کل قیود حاکم بر مسئله

و ثابت $K = 10$ در نظر گرفته می شود.

2- راجان¹ تابع پنالیتی را به صورت زیر تعریف می نماید [۱۵].

$$f_{Penalty} = r * C \quad (11-2)$$

$$r = K' * F_{\min} \quad \& \quad C = \sum_{q=1}^Q \max[0, g_q(X)] \quad (12-2)$$

C مشابه رابطه (10-2) می باشد و K' عددی ثابت که با نظر طراح انتخاب می شود. F_{\min} حداقل مقدار شایستگی برای کلیه طرح های قابل قبول نسل قبلی می باشد و مقدار r در نسل اول ، یک مقدار فرضی و تخمینی در نظر گرفته می شود.

¹. S.D.Rajan

تعیین ضرایب تابع جریمه اهمیت بسیار زیادی در کیفیت طرح بهینه دارد. مثال‌های عددی نشان داده است، زمانی که مقادیر کوچکی برای این ضرایب اختیار گردد، معمولاً نتایج به سمت مقادیر نامناسب همگرا می‌گردد. زیرا در این حالت، سهم تابع پنالتی، در مینیمم نمودن تابع شایستگی کم می‌شود؛ از طرف دیگر زمانی که مقادیر بزرگ برای این ضرایب اختیار شوند، جواب‌ها دارای نوسانات بسیار زیاد خواهند بود. جهت افزایش قدرت الگوریتم، می‌توان از تابع پنالتی متغیر استفاده نمود، به صورتی که مقادیر ضرایب در هر تعداد مشخصی از نسل‌ها افزایش یابد. برای کسب بینش بازتر، جهت تعیین مقادیر مناسب این ضرایب برای بهبود قدرت الگوریتم می‌توان از آزمایشات عددی بهره برد [1].

2-3-7 تابع هدف اصلاح شده

تابع هدف اصلاح شده عموماً براساس مقادیر تابع جریمه و تابع هدف تنظیم می‌شود. محققین GA روابط متنوع و گوناگونی را برای تابع هدف اصلاح شده و تابع شایستگی ارائه داده اند. معروف‌ترین آن‌ها راجیو و کریشنا مورتی می‌باشد که بشرح زیر پیشنهاد می‌نمایند [16]:

$$f(X) = F(X) + f_{Penalty} \quad (13-2)$$

در روابط فوق

$f(X)$: تابع هدف اصلاح شده

$F(X)$: تابع هدف

$f_{Penalty}$: تابع جریمه

کاربرد تابع هدف اصلاح شده هنگامی می‌باشد که تابع جریمه وجود داشته باشد زیرا بدیهی است که در صورت نبودن تابع جریمه مقدار تابع هدف با تابع هدف اصلاح شده برابر است.

8-3-2 شایستگی

پس از محاسبه تابع جریمه باید تابع هدف اصلاح شده و به تبع آن تابع شایستگی که معیار نهایی برای برآزش کروموزوم‌ها است محاسبه گردد.

راجیو و کریشنامورتی، تابع شایستگی را بشرح زیر پیشنهاد می‌نمایند [16]:

$$R(X) = [f_{\max}(X) + f_{\min}(X)] - f(X) \quad (14-2)$$

$f(X)$: تابع هدف اصلاح شده

$f_{\max}(X)$: حداکثر مقدار تابع هدف اصلاح شده در جمعیت حاضر

$f_{\min}(X)$: حداقل مقدار تابع هدف اصلاح شده در جمعیت حاضر

در هر صورت مطلب زیر در تمامی روابط و نظریات مربوط به تابع شایستگی حاکم است:

1- در مسئله کمینه سازی ، کروموزومی با کمترین مقدار تابع هدف اصلاح شده ، بیشترین

مقدار شایستگی را به خود اختصاص می‌دهد ؛ لذا شانس بیشتری برای حضور در جمعیت

بعدی دارد.

2 - مقادیر تابع شایستگی ، همواره مقداری مثبت است.

در نهایت امر تابع شایستگی به ازای هر کروموزوم محاسبه و میزان شایستگی هر کروموزوم بدست

می‌آید. حال زمان آن فرا رسیده است، تا با کمک مقادیر تابع شایستگی بهترین‌ها برای نسل بعد

برگزیده شوند. این مهم در فرآیند کلی به نام انتخاب به شرح زیر تبلور می‌یابد.

2-3-9 انتخاب¹

پس از برآزش کروموزوم‌های موجود در هر جمعیت نوبت به پدیده‌ی انتخاب کروموزوم‌های والد می‌رسد که بر اساس شایستگی یک کروموزوم منطبق است، هرچند شیوه‌های متعدد انتخاب کروموزوم تا به امروز مطرح گشته است ولی، ویژگی‌های مشترک در تمامی آن‌ها، انطباق روش بر اصل انتخاب طبیعی داروین است، بر این اساس که جواب‌های بهتر (کروموزوم‌های با شایستگی بیشتر) برای مساله از شانس بیشتری برای زاد و ولد برخوردارند. عکس این مطلب نیز صادق است، یعنی کروموزوم‌هایی با مقدار شایستگی کمتر، احتمال کمتری برای انتقال در استخر تولید مثل خواهند داشت در تمامی فرایندهای انتخاب هرگاه کروموزومی منتخب گردد، بدان معنی است که این کروموزوم شایستگی حضور در استخر تولید مثل² و یا حضور مستقیم در نسل بعدی را دارا است، به بیان ساده اینکه تعداد فرزندان که از هر فرد به وجود خواهد آمد در این مرحله تعیین می‌گردد. اما تعیین شیوه‌ها و تکنیک‌های انتخاب، بستگی به نوع مساله و شرایط حاکم بر آن را دارد. که هر کدام بنا به موقعیت و شرایط محیطی فضای مساله کارایی خاص خود را دارد. در ادامه به تفصیل و شرح مهمترین و رایج‌ترین روش‌های انتخاب، پرداخته شده است.

1- روش چرخ گردان³

2- روش رتبه بندی⁴

3- روش مسابقه⁵

¹ . Selection(Reproduction)

² . Mating Pool

³ . Roulette Wheel

⁴ . Rank

⁵ . Tournament

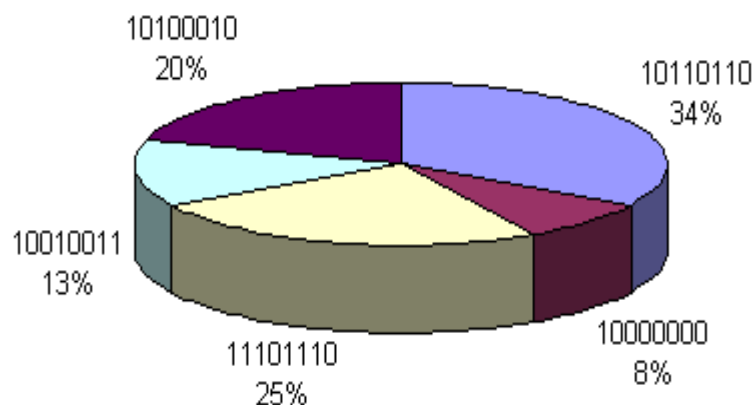
2-3-9-1 روش چرخ گردان

یکی از روش‌های متداول در فرآیند انتخاب، روش چرخ گردان است. در این روش رشته \square ام با یک احتمال از P_i (که از مقدار تابع شایستگی آن سرچشمه می‌گیرد) انتخاب می‌شود. بالطبع حاصل جمع این احتمال‌ها برای کل جمعیت بایستی برابر یک شود. احتمال هر رشته (کروموزوم) \square ام برابر است با [10]:

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^n F_j} \quad (15-2)$$

که n تعداد اعضای جمعیت و F مقدار تابع شایستگی هر رشته است.

حال اگر درصد احتمال این مقادیر را به صورت یک چرخ گردان نشان داده شود. مقادیر P_i ها، قطاع‌های چرخ گردان را تشکیل می‌دهد. (شکل 2-6) با تولید یک عدد تصادفی بین صفر و یک، کروموزومی با قطاع بزرگتر یا شایستگی بیشتر، شانس بیشتری برای حضور در جمعیت بعدی را می‌یابد.



شکل (2-6) - مدلی از چرخ گردان

برای اجرای این روش، می بایست در ابتدا مجموع مقادیر تابع شایستگی برای رشته های جمعیت مورد نظر را بدست آورد. آنگاه براساس رابطه (2-15) مقدار P_i برای هر کروموزوم محاسبه می شود. در ادامه مقدار \bar{P}_j بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود [۱۷]:

$$\bar{P}_j = \sum_{i=1}^m P_i \quad j=1, \mathbf{K}, n \quad (16-2)$$

که در آن n تعداد اعضای جمعیت و m شماره جمعیت یا کروموزوم موردنظر در جمعیت حاضر است.

حال به تعداد اعضای جمعیت ، اعداد تصادفی یکنواخت در محدوده صفر و یک تولید می شود. اگر عدد تصادفی تولید شده کوچکتر یا مساوی با \bar{P}_j نظیر کروموزوم z ام باشد؛ آن کروموزوم برای تکثیر انتخاب می شود و در استخر تولید مثل قرار می گیرد [۱۷].

2-9-3-2 روش رتبه بندی

در روش چرخ گردان ، اگر مقادیر شایستگی رشته ها ، خیلی با هم تفاوت داشته باشند، فرآیند انتخاب دچار مشکل می شود. مثلاً اگر بهترین شایستگی 85 درصد باشد، در حدود 85 درصد از شکل را اشغال خواهد کرد، بنابراین سایر کروموزومها شانس کمتری برای انتخاب شدن خواهند داشت [۱۰].

در روش رتبه بندی ابتدا جمعیت را بر اساس مقادیر شایستگی رتبه بندی می شوند. سپس انتخاب کروموزومها بر اساس رتبه هر رشته صورت می گیرد. مثلاً بدترین حالت (کمترین مقدار شایستگی) دارای رتبه یک و به همین ترتیب مورد بعدی دو و الی آخر، در نهایت بهترین مورد (کروموزومی با بیشترین شایستگی) دارای رتبه برابر n خواهد بود (n تعداد کروموزومهای موجود در جمعیت است).

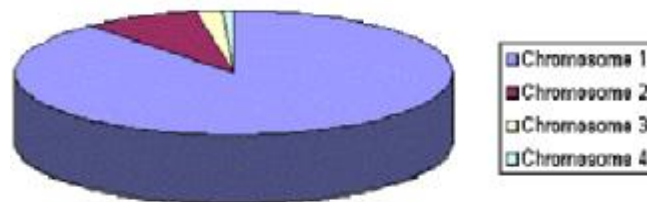
در روش رتبه‌بندی احتمال انتخاب رشته i ام به شرح زیر محاسبه می‌گردد [۸]:

$$P_i = \frac{m}{\sum_{j=1}^n j} \quad (17-2)$$

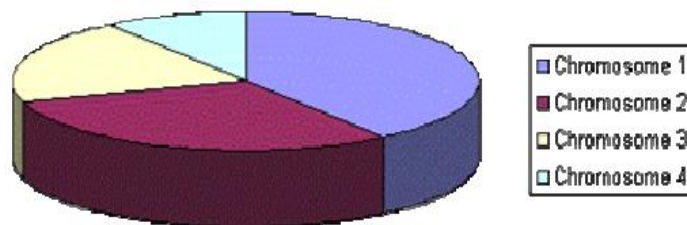
که در آن n تعداد اعضای جمعیت و m شماره رشته موردنظر در جمعیت حاضر است. در ادامه همانند روش چرخ گردان مقادیر تجمعی P_i بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{P}_j = \sum_{i=1}^m P_i \quad j=1, \mathbf{K}, n \quad (18-2)$$

سپس با تولید اعداد تصادفی یکنواخت در محدوده صفر تا یک و مقایسه آن با مقادیر تجمعی \bar{P}_i برای هر کروموزوم، رشته منتخب مشخص و در استخر تولید مثل کپی می‌شود. روش رتبه‌بندی و روش چرخ‌گردان در اشکال (7-2) و (8-2) مقایسه شده است [۸].



شکل (7-2) - موقعیت کروموزوم‌ها بر اساس روش چرخ‌گردان



شکل (8-2) - موقعیت کروموزوم‌ها پس از مرتب‌سازی بر اساس روش رتبه‌بندی

همان‌طور که در شکل (2-7) ملاحظه می‌شود؛ کروموزوم یک به دلیل شایستگی بالا، قسمت اعظم دایره را در روش چرخ‌گردان به خود اختصاص داده است و احتمال انتخاب آن در جمعیت بعدی بسیار زیاد است. در حالیکه کروموزوم چهار با دارا بودن قطاع بسیار کوچکی از دایره، شانس اندکی (تقریباً برابر صفر) برای حضور در حوضچه پیوند دارد.

این مسئله می‌تواند سبب به دام افتادن الگوریتم در نقطه بهینه محلی به دلیل همگرایی سریع الگوریتم شود. این مشکل در روش رتبه‌بندی حل شده است. همان‌طور که در شکل (2-8) دیده می‌شود؛ نسبت قطاع دایره برای کروموزوم یک و چهار خیلی زیاد نیست. بدین سان الگوریتم به سرعت همگرا نشده و احتمال حضور کروموزوم‌هایی با شایستگی پایین نیز در استخر تولیدمثل وجود دارد. ممکن است کروموزوم‌هایی با شایستگی پایین حاوی زیررشته‌های مناسبی برای طرح بهینه باشند. و حضور آن‌ها در استخر تولید مثل، لازم باشد.

ضعف روش رتبه‌بندی تنها در آن است که به آهستگی همگرا^۱ می‌شود. زیرا بهترین کروموزوم‌ها تفاوت چندانی با هم ندارند و همین امر باعث همگرایی آهسته آن می‌شود. لذا برای جمعیت‌های بزرگ توصیه نمی‌شود [۱۰].

3-9-3-2 روش مسابقه‌ای

در روش چرخ‌گردان الگوریتم گاهی با مشکلاتی از قبیل کندی و همگرایی ناگهانی به خاطر کوچک شدن سریع فضای جستجو مواجه می‌شود. روش رتبه‌بندی نیز به دلیل آهستگی همگرایی و مشکلاتی از این قبیل، برای جمعیت‌های بزرگ زیاد مناسب نیست. برای گریز از این معایب، معمولاً از روش دیگری به نام روش مسابقه‌ای استفاده می‌شود. این روش نخستین بار توسط گلدبرگ و دب در سال 1991 ارائه شده است [۱۷].

¹ . Slow Convergence

در روش مسابقه‌ای که شبیه رقابت در طبیعت است ، یک زیر مجموعه کوچک از کروموزوم‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده و به رقابت می‌پردازند. معیار رقابت ، میزان شایستگی هر کروموزوم است. سرانجام در این رقابت یکی از کروموزوم‌ها به پیروزی رسیده و به عنوان والد جدید انتخاب می‌شود. این فرآیند تا انتخاب همه‌ی والدها در جمعیت جدید ، تکرار می‌شود. به عبارت دیگر ، عملیات فوق به تعداد اعضای جمعیت تکرار می‌شود. [۱۰]

به عنوان مثال جمعیتی با شایستگی‌های شکل (2-9) را در نظر بگیرید. برای نمونه موارد 4 و 9 به صورت تصادفی برای رقابت انتخاب می‌شوند که در این مرحله مورد 4 برنده می‌شود (به خاطر شایستگی بیشتر) و رشته آن (کروموزوم مربوطه) از جمعیت اولیه انتخاب و در استخر تولید¹ مثل کپی می‌شود.

شماره کروموزوم	میزان شایستگی
1	1.26
2	3.64
3	2.38
4	9.41
5	6.45
6	4.68
7	2.1
8	1.26
9	7.27
10	5.68

شکل (2-9) شایستگی هر رشته



کروموزوم های مورد مقایسه	کروموزوم منتخب بعد از تولید مثل
(5 و 1)	5
(6 و 3)	6
(10 و 7)	10
(5 و 4)	4
(9 و 4)	4
(8 و 2)	2
(1 و 6)	6
(8 و 9)	9
(2 و 3)	2
(6 و 7)	6

شکل (2-10) کروموزوم‌های منتخب

¹ . Mating pool

این روند تا انتخاب تمامی کروموزوم‌ها ادامه می‌یابد. در نهایت همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود کروموزوم‌های 5 و 9 و 10 هر کدام یک کپی، کروموزوم‌های 2 و 4 دو کپی، کروموزوم 6 سه کپی و مقادیر 1 و 3 و 7 و 8 نیز حذف شده‌اند.

این روش در جمعیت‌های بسیار بزرگ به عنوان بهترین روش شناخته می‌شود. مقدار کروموزوم منتخب برای رقابت به تعداد اعضای جمعیت بستگی دارد و تحت عنوان سایز رقابت¹ به عهده کاربر گذاشته می‌شود. اما عموماً دو یا سه کروموزوم برای رقابت انتخاب می‌شوند [۱۹]. یانگ و همکارانش² نخستین افرادی بودند که روش مسابقه‌ای را در مهندسی عمران جهت بهینه‌سازی سازه‌ها بکار گرفتند [۲۰].

2-3-10 مفهوم برگزیده (شایسته سالاری)

استراتژی نخبه‌گرایی یا مفهوم برگزیده، نخستین بار توسط فردی به نام دی جانگ³ در سال 1975 مطرح شد [21]. بر اساس این روش بهترین کروموزوم بر مبنای شایستگی در جمعیت جدید بدون آنکه وارد استخر تولیدمثل شود؛ در نسل بعدی کپی می‌شوند. این کار برای آن است تا بهترین کروموزوم نسل حاضر، در نسل بعدی حضور داشته باشند.

به کمک استراتژی فوق اطمینان حاصل می‌گردد که بهترین فرزند هر نسل نسبت به بهترین فرزند نسل‌های گذشته دارای نمره شایستگی پایین‌تری نخواهد بود. این روش اغلب به صورت ترکیبی با سایر روش‌های انتخابی ارائه می‌شود. استفاده از مفهوم برگزیده باعث افزایش کارایی GA می‌گردد، زیرا مانع از گم شدن جواب‌های خوب به دست آمده می‌شود. استراتژی نخبه‌گرایی تأثیر بسزایی در همگرایی الگوریتم داشته و استفاده از آن در مقالات گوناگون، بررسی و توصیه شده است [21].

¹ . Size Tournament

² . Yang, J. et al

³ . Kenneth De Jong

اغلب استراتژی نخبه‌گرایی بر یک کروموزوم (بهترین کروموزوم) اعمال می‌گردد. اما در این پایان‌نامه به صورت پیشنهادی استراتژی نخبه‌گرایی بر تعدادی کروموزوم انجام می‌شود که تعداد آن درصدی از جمعیت کل است که به عهده کاربر می‌باشد.

GA عملگرهای 11-3-2

پس از مراحل انتخاب کروموزوم‌های والد بر طبق هرکدام از روش‌های اشاره شده در بالا، نوبت به تولید نسل بعدی می‌رسد، مجموعه فعالیت‌هایی که در حوضچه تولیدمثل انجام می‌گردد تا نسل‌های بعدی تولید شده، هر یک بخشی از اطلاعات روی کروموزوم‌های مولد خود را دارا باشند توسط عملگرهای ژنتیک انجام می‌گیرد.

سپس طی فرآیند بکارگیری عملگرهای الگوریتم ژنتیک، رشته‌های بهتر و جدید تولید و تکثیر خواهند گردید و در نتیجه این ساختار الگوریتم سبب جستجوی بیشتر و بهتر در فضای طراحی می‌گردد.

در یک نگاه کلی این عملگرهای الگوریتم ژنتیک را می‌توان به دسته‌های زیر تقسیم نمود [8]:

1- عمل جفت‌گیری یا ادغام (تقاطع)¹

2- عمل معکوس کردن²

3- عمل حذف و کپی کردن³

4- عمل حذف و تولید مجدد⁴

5- عمل جداسازی¹

¹. Crossover

². Inversion

³. Deletion And Duplication

⁴. Deletion And Regeneration

6- عمل نقل مکان²

7- عمل بخش بندی³

8 - عمل غالب شدن یا تسلط⁴

9 - عمل ادغام و معکوس سازی⁵

10 - روش تکثیر میانی

11 - عملگرهای بیتی⁶

12 - عملگر جهش⁷

که معمولاً در یک الگوریتم ژنتیک ساده⁸ تنها از دو عملگر اصلی زیر پس از فرآیند انتخاب استفاده می‌شود:

1- ادغام

2- جهش

2-3-11-1 عملگر ادغام

در مرحله انتخاب جمعیتی از بهترین کروموزوم‌ها شکل می‌گیرد. در فرآیند ادغام، هدف تولید رشته‌های بهتر و جدید (تولید فرزندان) می‌باشد. فرآیند ادغام، با هدف تعویض ویژگی طرح‌ها در میان اعضای جمعیت، به قصد بهبود شایستگی نسل بعد انجام می‌شود. این مشابه با انتقال صفات

¹ . Segregation

² . Migration

³ . Sharing

⁴ . Dominance

⁵ . Cross Over And Inversion

⁶ . Bite-Wise Operator

⁷ . Mutation

⁸ . Simple Genetic Algorithm

ژنتیکی در فرآیندهای زایش موجودات زنده است که توسط DNA و RNA صورت می‌پذیرد. پیوند سبب جستجوی بیشتر در فضای طراحی می‌گردد.

عملگر ادغام یک عملگر ترکیبی است که شامل سه مرحله است. در مرحله اول یک جفت رشته به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در مرحله دوم یک زیررشته، از کروموزوم‌ها به طور تصادفی در طول رشته انتخاب خواهد شد. بایستی توجه داشت که طول زیررشته در هر دو کروموزوم، ثابت باشد. سرانجام در سومین مرحله زیررشته منتخب در دو رشته والد جابه‌جا می‌شود.

روش‌های مختلف و متنوعی برای عمل ادغام وجود دارد. بر اساس نظریه دب¹ نمی‌توان گفت که کدامیک از روش‌های ادغام بهتر است [10]. در هر حال مشهورترین روش‌های ادغام بشرح زیر خلاصه می‌شوند:

1- روش ادغام تک نقطه‌ای یا مکانی²

2- روش ادغام دو نقطه‌ای³

3- روش ادغام چند نقطه‌ای⁴

4- روش ادغام یکنواخت⁵

5- روش ادغام متغیر

¹ . Deb

² . Single-Sight Cross Over

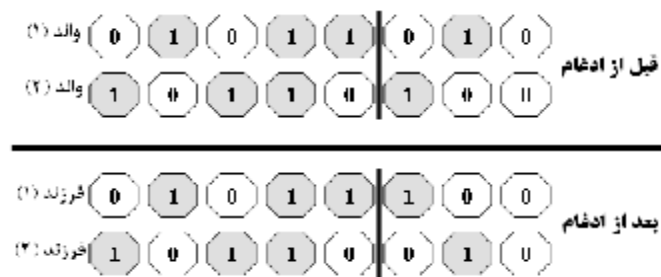
³ . Two-Point Cross Over

⁴ . Multi-Point Cross Over

⁵ . Uniform Cross Over

2-3-11-1-1 روش ادغام تک نقطه‌ای یا مکانی

در روش ادغام تک نقطه‌ای، یک مکان بطور تصادفی در طول رشته‌ها انتخاب می‌شود و بیت‌های بعد از این مکان جابجا می‌شوند. شکل (2-11) نمونه‌ای از روش ادغام تک نقطه‌ای را نشان می‌دهد. در این شکل کلیه بیت‌ها پس از خط ادغام (سه بیت) بین دو رشته جابجا شده و فرزندان تولید می‌شوند.



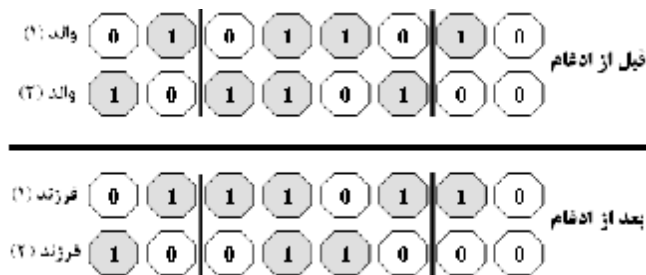
شکل (2-11) روش ادغام تک نقطه‌ای

از آنجایی که مکان جابجایی به صورت تصادفی انتخاب شده است لذا از مناسب بودن این مکان اطلاعی در دست نیست. اگر این نقطه مکان مناسبی باشد منجر به تولید فرزندان مناسبی می‌شود در غیر این صورت باعث از بین رفتن کیفیت رشته‌های والد و حذف آن‌ها در نسل بعدی می‌گردد. برخی از مقالات همچون مرجع [21] این روش را توصیه نمی‌نمایند.

2-3-11-3-2 روش ادغام دو نقطه‌ای

روش ادغام دو نقطه‌ای توسط اشلمن و همکارانش¹ در سال 1989 ارائه شد [7]. عملگر پیوند دو نقطه‌ای، تقریباً مشابه روش ادغام تک نقطه‌ای است. با این تفاوت که در این روش دو مکان را به صورت تصادفی در طول رشته‌ها انتخاب کرده و اطلاعات بین این دو نقطه جابجا می‌شود. در شکل (2-12) روش ادغام دو نقطه‌ای نشان داده شده است.

¹ . Eshelman, et al.



شکل (2-12) - روش ادغام دو نقطه ای

3-1-11-3-2 نرخ ادغام¹

در انجام فرآیند ادغام با تعریف ثابتی به نام نرخ ادغام (پیوند) ، شانس حضور کروموزوم در فرآیند ادغام بررسی می‌شود. نرخ ادغام بیانگر احتمال ادغام است که آن را با p_c نشان می‌دهند و مقدار آن بین 0 و 1 است. با فرض احتمال ادغام p_c می‌توان گفت که $100 * p_c$ درصد از رشته‌های موجود در استخر تولیدمثل در عملیات ادغام به کار رفته‌اند و $100 * (1 - p_c)$ درصد از جمعیت باقی می‌مانند.

نحوه انجام کار به این صورت است که ، با انتخاب مقدار نرخ پیوند ، برای هر کروموزوم یک عدد تصادفی در محدوده صفر تا یک تولید می‌شود. اگر عدد تصادفی تولید شده از نرخ ادغام کمتر باشد ، این کروموزوم برای آمیزش با کروموزوم بعدی که شرایط فوق را دارد، انتخاب می‌شود.

انتخاب نرخ ادغام مناسب نیز ، اغلب مشکل‌ساز است. اگر خیلی زیاد باشد ، باعث می‌شود که فرصت تطابق در کروموزوم از دست برود و اگر خیلی کم باشد، تعداد فرزندان تولید شده کافی نخواهد بود [8] .

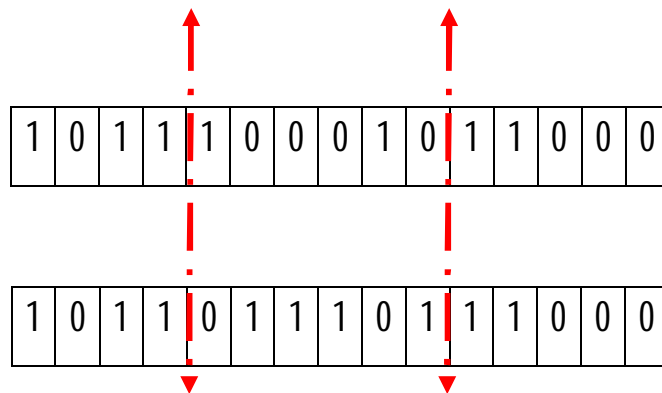
¹ . Cross Over Rate

2-11-3-2 عمل معکوس سازی

بر اساس این فرایند، یک رشته از داخل جمعیت انتخاب شده و به صورت تصادفی دو نقطه در میان آن تعیین می گردد. سپس همه بیت های این زیر رشته معکوس می گردد. گفتنی است که، در این روش تنها به یک والد نیاز است. این معکوس سازی را می توان به دو صورت انجام داد [17]:

- 1- در این حالت هر بیت معکوس می شود. یعنی اگر صفر است تبدیل به یک می شود و بالعکس. این حالت ، مختص روش کدگذاری دودویی است.
- 2- در این حالت زیر رشته ، معکوس می شود.

در هر حال ، انجام عمل معکوس سازی نیز همانند فرآیند ادغام بر اساس ثابتی به نام نرخ معکوس¹ سازی انجام می شود. این نرخ بیانگر احتمال معکوس سازی برای هر کروموزوم است. شیوه اعمال نرخ معکوس سازی همانند روش ادغام می باشد. قابل ذکر است که عملیات فوق نیازمند تنها یک والد است.



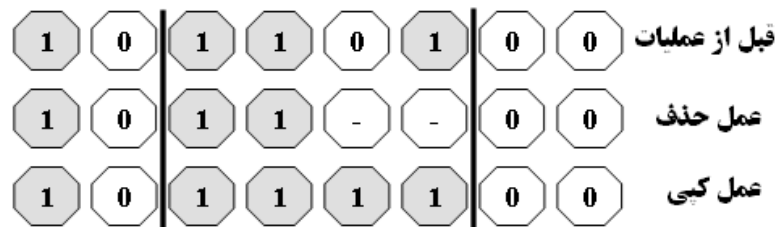
شکل (2-13) عمل معکوس سازی

2-11-3-3 عمل حذف و کپی

در این عمل یک رشته از داخل جمعیت متناسب با نرخ عملیات انتخاب شده و به صورت تصادفی دو نقطه از آن برگزیده می شود. سپس نصف بیت های زیررشته مورد نظر حذف شده و بیت

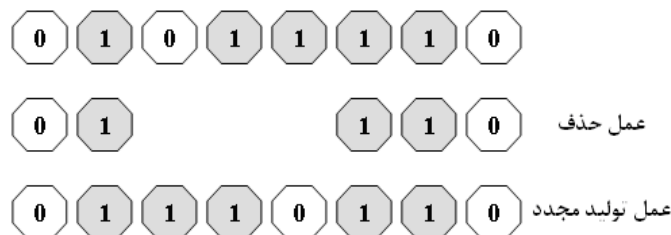
¹ . Inversion Rate

های قبلی آن ها کپی می شود. لازم به ذکر است که این عملیات نیز تنها نیازمند یک والد است. شکل (2-14) عملیات حذف و کپی را بر روی یک رشته نشان می دهد [22].



شکل (2-14) عمل حذف و کپی بیت‌های پیشین

شایان ذکر است عمل حذف و تولید مجدد همان طور که در شکل ذیل مشاهده می گردد، مانند روش فوق است با این تفاوت که در این عمل ژن‌های بین دو نقطه از رشته منتخب حذف شده و به صورت تصادفی مجدداً تولید می شوند.



شکل (2-15) عمل حذف و تولید مجدد

2-3-12 جهش

در طبیعت، جهش فرایندی است که در آن یک بخش از یک ژن به صورت تصادفی تغییر می

کند. در جهش، هر فرد به تنهایی، با توجه به قوانین احتمال می تواند تغییر کند [9]. در الگوریتم

ژنتیک نیز جهش با یک احتمال کوچک جهت باز تاباندن نرخ جهش در دنیای واقعی وارد عمل

می گردد. به طور مثال در بعضی مواقع در حین انجام فرایندهای تکثیر و ادغام، بیت خاصی از تمامی

کروموزوم‌ها، فاقد عدد مشخصی می گردد، در این صورت دیگر بازیابی این بیت با عملگرهای تکثیر و

ادغام غیرممکن می گردد به طور فرض، 8 کروموزوم شکل شماره (2-16) را در نظر بگیرید، در تمامی

کروموزوم‌ها بیت 5 از سمت چپ عدد صفر است، در این حالت تحت هیچ شرایطی امکان رخداد عدد 1 در این جایگاه خاص تحت تکثیر و ادغام وجود ندارد [1].

110001	101001	000100	111101
010101	000001	111000	011100

شکل (2-16) هشت رشته کروموزوم را نشان می‌دهد

این محدودیت ممکن است موجب جلوگیری از بدست آوردن یک جواب بهینه از الگوریتم شود، جهت جلوگیری از این مشکل و فرار از این بن‌بست، می‌توان از عملگر جهش استفاده نمود، زیرا که در جهش تمامی بیت‌ها با در نظرگیری احتمال جهش، شانس تغییر را دارا می‌باشند [1].

بنابراین نقش جهش در الگوریتم ژنتیک، بازگرداندن موارد ژنتیکی گم شده و یا پیدا نشده به داخل جمعیت است. بدین سان با استعانت از اپراتور جهش از همگرایی زودرس الگوریتم ژنتیک و کسب جواب‌های بهینه محلی جلوگیری می‌شود. به عبارت دیگر در یک کلام می‌توان گفت اپراتور جهش، سبب جستجوی بهتر فضای طراحی می‌شود.

2-3-12-1 عمل جهش در کدگذاری دودویی

عمل جهش یک بیت، شامل تبدیل عدد صفر به یک و بالعکس است که بر اساس یک احتمال کوچک به نام نرخ جهش¹ (p_m) به صورت بیت به بیت صورت می‌گیرد. عمل جهش به این ترتیب است که یک عدد تصادفی برای هر کروموزوم بین صفر تا یک تولید می‌شود؛ اگر عدد تولید شده کوچکتر از p_m باشد مقدار خروجی را برابر درست² و گرنه برابر غلط³ در نظر گرفته می‌شود. اگر برای

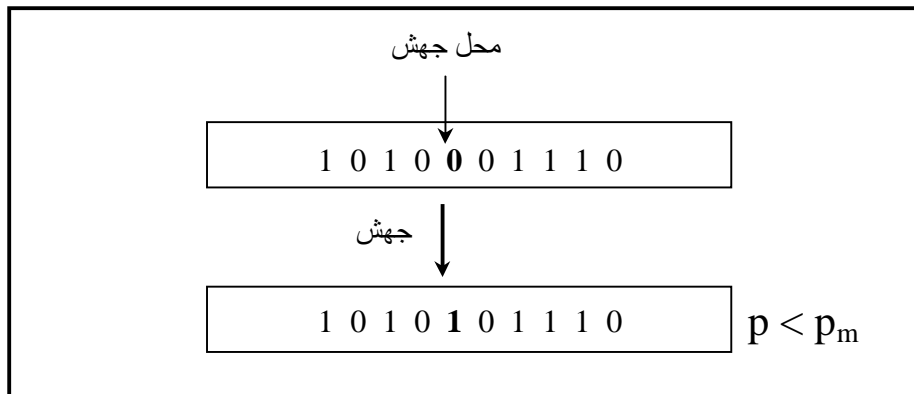
¹ .Mutation Rate

² . True

³ . False

هر بیت مقدار خروجی درست باشد، بیت تغییر می‌کند و گرنه بیت بدون تغییر باقی خواهد ماند (شکل 2-17).

بیت‌های یک رشته بصورت مستقل جهش می‌یابند، به این معنا که جهش یک بیت بر روی احتمال جهش سایر بیت‌ها تأثیر نمی‌گذارد. این عمل در یک الگوریتم ژنتیک ساده به منزله‌ی یک عملگر ثانویه و به منظور حفظ اطلاعاتی که در حال از دست رفتن است، تلقی می‌گردد. به کمک این عملگر می‌توان امید داشت که کروموزوم‌های خوب که در مراحل انتخاب و یا تکثیر حذف شده‌اند، دوباره احیا شوند [8].



شکل 2-17 عمل جهش را در بیت 5 نشان می‌دهد

2-12-3-2 نرخ جهش

p_m یا همان احتمال جهش در کروموزوم‌ها معمولاً در حدود 0.001 تا 0.01 در نظر گرفته می‌شود [9]، با این احتمال اندک، این عملگر تضمین می‌نماید که احتمال رخداد هر نقطه در فضای مساله هیچ‌گاه صفر نگردد. در بعضی از مراجع این نرخ برای یک جمعیت با اندازه‌ی 20 تا 200 مقداری بین 0.005 تا 0.05 نیز توصیه شده است [8]. به هر تقدیر باید توجه داشت، نرخ‌های جهش پایین سبب همگرایی سریع و عدم تحرک در فضای جستجو می‌گردد، از سوی دیگر نرخ‌های جهش بالا سبب می‌گردد که عملیات GA به سمت روند جستجوی تصادفی میل نماید که گاه موجب از بین

رفتن کروموزوم های نخبه‌ی تولید شده در نسل‌های ابتدایی و میانی می‌شود که جهت رفع این نقیصه، بهره جویی از الگوریتم‌های نخبه‌گرا توصیه می‌گردد.

نرخ جهش را می‌توان ثابت در نظر گرفت و یا پیشنهاد می‌شود آن را متناسب با تعداد نسل‌های تولید شده قرار داد. در این صورت دو حالت وجود دارد که به شرح زیر است:

1- در این حالت نرخ جهش بصورت افزایشی می‌باشد. یعنی در ابتدا جهش با احتمال کمی اعمال شده و در خلال عملیات GA، متناسب با نسبت شماره نسل به تعداد کل نسل‌ها افزایش می‌یابد. یعنی:

$$p_m = p_m^{min} + (p_m^{max} - p_m^{min}) \frac{t}{T} \quad (19-2)$$

2- در این حالت نرخ جهش بصورت کاهشی می‌باشد. یعنی در ابتدا جهش با بیشترین احتمال اعمال می‌شود و در خلال فرآیند GA، رشد نزولی خود را متناسب با نسبت شماره نسل به تعداد کل نسل‌ها، درپیش می‌گیرد. یعنی:

$$p_m = p_m^{max} - (p_m^{max} - p_m^{min}) \frac{t}{T} \quad (20-2)$$

متغیرهای موجود در روابط (19-2) و (20-2) عبارتند از:

p_m مقدار نرخ جهش در هر نسل

p_m^{max} حداکثر مقدار نرخ جهش در فرآیند GA

p_m^{min} حداقل مقدار نرخ جهش در فرآیند GA

t شماره نسل حاضر

T تعداد کل نسل‌سازی

2-3-13 دستور خروج از الگوریتم

از آنجا که الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی تصادفی است، و سویی دیگر به علت ذات مسائل بهینه‌سازی که جواب مساله از قبل مشخص نمی‌باشد، ارائه یک فرمول خاص برای خاتمه الگوریتم مشکل می‌باشد.

برخی از شرط های متداول توقف عملیات GA عبارتند از [7]:

- 1- رسیدن به جواب¹ از پیش تعیین شده: این ساده‌ترین فکر برای همگرایی است. به این معنی که اگر تصور شد الگوریتم به مقدار کروموزوم مناسب رسیده است، الگوریتم متوقف شود.
- 2- عدم پیشرفت²: یعنی الگوریتم ژنتیک پس از n بار تکرار با همان کروموزوم‌های قبلی ادامه پیدا کند؛ در این صورت الگوریتم متوقف می‌شود. در این حالت ممکن است الگوریتم در یک نقطه کمینه نسبی، به دام افتاده باشد.
- 3- روش آماری³: اگر انحراف از معیار⁴ مقادیر شایستگی جمعیت به یک مقدار مشخصی رسید، الگوریتم متوقف می‌شود. این بدان مفهوم است که مقادیر شایستگی جمعیت با یکدیگر تفاوت چندانی نداشته باشند.
- 4- تعداد تکرارها⁵: اگر با هیچ کدام از موارد فوق جواب نداد، شرط توقف براساس تعداد تکرار بنا می‌شود.

در هر صورت باید اذعان داشت که ممکن است الگوریتم ژنتیک نیز، همانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی، به جواب بهینه نرسد و یا در نقطه کمینه نسبی گرفتار شود. متأسفانه یکی از محدودیت‌های استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و به طور خاص الگوریتم ژنتیک، وابستگی شدید نتایج

¹ . Correct Answer

² . No Improvement

³ . Statistics

⁴ . Standard Deviation

⁵ . Number Of Iterations

الگوریتم به پارامترهای GA همانند: اندازه جمعیت، نوع روش انتخاب، نوع عملگرهای ژنتیک همچون ادغام، جهش ... و همچنین نرخ عملگرهای ژنتیک است. که این مساله با توجه به زمان مورد نیاز برای اجرای این الگوریتم‌ها، مخصوصاً در مسائل پیچیده و بزرگ، بسیار نامطلوب به نظر می‌رسد. یکی از روش‌های بدیهی برای آنکه، الگوریتم ژنتیک به یک حل بهینه محلی همگرا نشود، تغییر پارامترهای آن و اجرای مجدد الگوریتم است. روش بهتر استفاه از الگوریتم ژنتیک جزیره‌ای (توزیعی) است که در فصول بعد تشریح و در این پایان‌نامه استفاده شده است.

فصل روم:

بررسی سازه‌های فضاکار

3-1 مقدمه

نیاز انسان به داشتن سر پناه و مکانی که در آن بیاساید، اندیشه ساختن خانه را مترتب شد. بشر برای کار و تفریح و دیگر ارتباطات، نیاز به مکان هایی پیدا کرد تا در انجام امور مربوطه دچار کاستی نگردد. به مرور بر اندازه این مکان ها چه در مساحت و چه در ارتفاع افزوده شد. مصالحی که توسط آن بناها ساخته می شد مقاوم تر شدند و فنون ساخت پیشرفت کرد. به مرور انسان خود را نیازمند بناهایی بزرگتر با پوشش سقف و بدون ستونی در میان این فضاها دید. مشکل اساسی در این بخش استواری سقف بود تا سقف بتواند سختی لازم را داشته باشد .

بشر در حل این مشکل از طبیعت الهام گرفت، از آنجایی که طبیعت همواره در جهت حداقل انرژی رفتار می کند دست به ساخت فرم هایی زد که با مصالح کمتر حداکثر بهره سازه ای برده شود. برای مثال در سال 1940 م. Le recolais، یکی از ترویج دهندگان مشهور سازه های فضاکار، توجه همگان را به گونه ی ژئودزیک سطوح کروی جلب کرد که ویژگی اسکلت های استخوانی *radia tuscaretta globosa* را داشتند . انسان هرگز در تقلید اینگونه از نمونه های برگرفته از طبیعت کم اشتیاق نبوده است.

تاریخچه سازه های فضاکار به هزاران سال پیش برمی گردد. برخی از معروفترین سازه های فضاکار در عهد گذشته عبارتند از : خزانه ی آتریوس در میسناس (گنبد پلکانی، 1325 ق.م)؛

پانتئون رم (گنبد بتنی به دهانه ی 44 متر 123 میلادی)؛ مسجد ایاصوفیه واقع در استانبول (گنبد آجری به دهانه ی 32.6 متر و ارتفاع تاج 14 متر، 537 میلادی)؛ و طاق کسری ایران (طاق نیم بشکه ای از خشت، حدود سال 400 میلادی).

در مقایسه با سایر سیستم های سازه ای ، سازه فضاکار دارای چندین مزیت است که یکی از این مزایا سبکی آن است. سبکی سازه بیشتر به این دلیل است که مصالح توزیع فضایی دارند، به گونه ای که مکانیزم انتقال بار عمدتاً محوری است . بنابر این از مصالح عضوهای سازه به طور کامل استفاده می شود.

3-2 تاریخچه

از آنجایی که بررسی سیر تحولات یک صنعت خالی از لطف نیست در این بخش به آن پرداخته می شود. تا اواسط قرن هجدهم مصالح اصلی در دسترس برای معماران و مهندسان ،سنگ ، چوب و آجر بود. فلزات کاربرد محدودی داشتند و اغلب برای ایجاد اتصال بین قطعات ساخته شده از سایر مصالح، به کار می رفتند. از گستره ی وسیع مصالح موجود در آن زمان ،سنگ و آجر در برابر فشار مقاوم ولی در برابر کشش ضعیف بودند، به همین دلیل برای سازه های سه بعدی مثل گنبدها و طاقها مناسب بودند . از میان این سازه ها می توان به کلیسای سنت پیترز¹ در رم(93-1588) و سانتاماریادل فیوره² در فلورانس (34-1420) (شکل 3-1) اشاره کرد که هر دو در پایه گنبد، قطری معادل 42 متر داشتند.[23]

¹ - saint peters

² - santa maria del fiore



شکل 3-1: کلیسای سانتاماریادل فیوره

چوب مقاومت زیادی در برابر کشش و فشار دارد ولی به صورت طبیعی تنها در طول ها و مقاطع عرضی در دسترس است. در سازه های سه بعدی با مقیاس بزرگ، اتصال چوب ها یک مشکل اساسی است. اما ابعاد معبد تودای-جی¹ در شهر نارا (شکل 3-2) در کشور ژاپن که بزرگترین ساختمان چوبی قدیمی در جهان است، $57*57$ متر و ارتفاع آن 47 متر است. اگرچه این مصالح در ساخت سازه های با مقیاس بزرگ هم به کار رفته اند، ولی دهانه های این ساختمان ها محدود بوده و معمولا بسیار سنگین ساخته شده اند. با وقوع انقلاب صنعتی، تولید آهن و سپس فولاد گسترش یافت و تولید مصالح با مقاومت زیاد، ساختن ساختمان های با ارتفاع بیشتر و دهانه های وسیع تر را امکان پذیر ساخت. تقریبا در همان زمان روش های ریاضی برای توضیح و پیش بینی رفتار سازه ها و درک نحوه مقاومت مصالح به سرعت توسعه یافت. همزمان با توسعه راه

¹ - Todai-ji

آهن و صنعتی شدن تولیدات کالاها ، تقاضا جهت سازه‌های با دهانه‌ی وسیع برای پل‌ها ، ایستگاه‌ها ، ساختمان انبارها و کارخانه‌ها افزایش یافت .



شکل 3-2: معبد تودای - جی

با دسترسی وسیع‌تر به آهن و فولاد و تقاضا جهت دهانه‌های طولی‌تر، یک دوره‌ی جدید در توسعه فرم‌های سازه‌ای جدید آغاز شد . در اولین مرحله مجموعه‌ای از سازه‌های متنوع شکل گرفت. در مراحل بعد سازه‌های فضاکار سه بعدی به وجود آمدند. بسیاری از فرم‌های سازه‌ای به ویژه اغلب شبکه‌های فضاکار، از مدول‌ها تشکیل شده اند. نظریه‌ی ساخت ساختمان‌های مدولار به صورت یک رویای تحقق یافته تقریباً 150 سال قبل ، با طراحی ، ساخت و نصب قاب‌های فلزی کریستال پالاس در هاید پارک لندن (برای برگزاری نمایشگاه بزرگی در سال 1851) شکل عملی یافت و کارایی این روش به خوبی نشان داده شد.

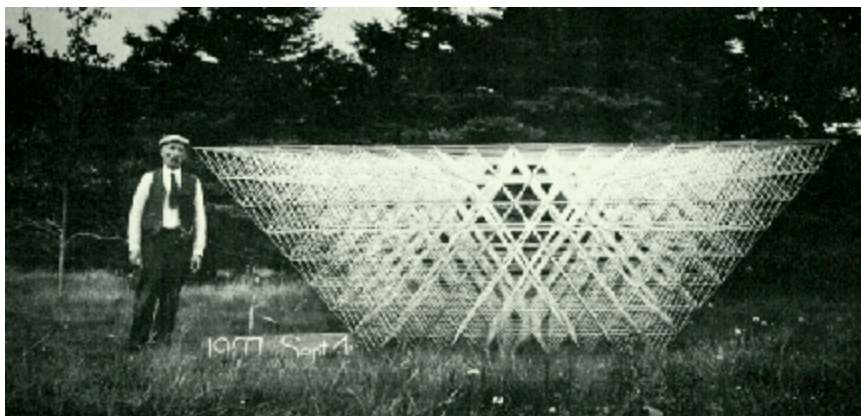
سازه‌های نمادین مانند برج ایفل که از آهن شکل داده شده بین سال‌های 1897 و 1899 در شهر پاریس ساخته شد، دلیلی بر پایداری و دوام سازه‌های فلزی سه بعدی مدولار به شمار

می‌رود. این ساختمان در ابتدا به عنوان یک سازه موقت در نظر گرفته می‌شد ، ولی امروزه با گذشت بیش از 100 سال هنوز پابرجاست. متاسفانه، ساختمان با شکوه گالری ماشین با دهانه وسیع 114 متر که توسط کنتامین و دوترت¹ در همان زمان در کنار برج ایفل ساخته شد، باقی نمانده است. این نوع سازه‌ها امکان کاربرد آهن و فولاد را برای اجرای ساختمان‌های بلند مرتبه و با دهانه‌های وسیع به خوبی اثبات کردند و زمینه‌های بروز ابتکار معماران و مهندسان برای استفاده از روش‌های جدید، کارآمد را فراهم ساخته است.

از دیگر سازه‌های فضاکار اولیه، گنبدهایی بود که توسط مهندسان آلمانی Schwedler و zimmerman در قرن نوزدهم ساخته شدند. از این گنبدها می‌توان، ساخت دهانه 361 فوتی برای سازه نمایشگاه لیون در سال 1894 توسط zimmerman را نام برد . گنبدی از نوع schwedler بلافاصله پس از جنگ جهانی دوم بر فراز مرکز شارلوت در کارولینای شمالی امریکا ساخته شد که طول دهانه آن حدود 332 فوت بود.

شاید قدیمی‌ترین نمونه‌ها از آنچه امروزه به عنوان قاب فضاکار یا شبکه فضایی می‌شناسیم (و دارای امتیازهایی نظیر سبکی ، مقاومت، سه بعدی بودن، امکان تولید انبوه و اجرا به روش سازه های مدولار می‌باشد) توسط الکساندر گراهام بل (1847-1922) رواج یافت . در دهه اول قرن بیستم او خرپاهای فضایی مرکب از قطعات چهار وجهی و هشت وجهی را آزمایش کرد (شکل 3-3) در مجله نشنال ژئوگرافی در سال 1903 ، بل به شرح ساختمان کایت پرداخت.

¹ - Contamin & Dutert



شکل 3-3: تجارب اولیه سازه های فضاکار توسط الکساندر گراهام بل

" البته، کاربرد یک واحد چهار وجهی محدود به ساخت استخوان بندی مناسب برای کایت و ماشین های پرواز نمی شود. این برای هر نوع سازه ای که در آن ترکیبی از کیفیت، مقاومت و سبکی مطلوب است، قابل استفاده است. همانطور که می توانیم خانه ها را از آجر بسازیم، می توانیم سازه هایی از انواع قاب های چهاروجهی با کیفیت، مقاوت و سبکی (مشابه ویژگی های واحدهای مجرد) بنا کنیم. [24]

همچنان که در این عبارت دیده می شود، گراهام بل خصوصیات دوگانه ای مقاومت بالا و سبکی وزن را با فرم های چهار وجهی سه بعدی صلب به نمایش گذاشت و از آن ها در بسیاری از پروژه هایش استفاده کرد. یکی از اولین سازه های مشبک فضایی فولادی با استفاده از اتصالات ریخته گری شده و اعضای لوله ای، یک برج دیده بانی در بین بریگ¹، آمریکا بود که در سال 1907 توسط بل ساخته شد.

با وجود توسعه و پیشرفت حاصل از تلاش های گراهام بل در زمینه خرپای فضایی سه بعدی سبک وزن در اوایل قرن بیستم، تا قبل از معرفی سیستم مرو² در سال 1937، این خرپا در معماری کاربرد چندانی نداشت و رو به فراموشی بود. سیستم مرو شبکه فضایی بود که به صورت گسترده در

¹ - Beinn Bhreagh

² - MERO

دسترس معماران و مهندسان قرار گرفت و توسط دکتر مکس من گرینگ هوسن¹ معرفی شد. او دریافته بود که رواج سازه‌های فضاکار در مقیاس بزرگ جهانی، فقط در صورتی امکان پذیر خواهد بود که اجزای سازه به صورت کارخانه ای تولید و مونتاژ آن در محل انجام شود.

این سیستم، که همچنان رایج‌ترین روش در ساخت خرپاهای فضایی است، شامل اعضای لوله‌ای منفرد و اتصالاتی از نوع پیوندهای کروی (گوی سان) است. عمومیت استفاده از این روش تا به امروز به این دلیل ادامه دارد که علاوه بر زیبایی سازه‌ای می‌تواند به اشکال گوناگون و با سیستم‌های متنوع، متشکل از پیوندهای کروی و لوله‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

یک نوع شناخته شده از سیستم سازه فضایی، شبکه‌های دولایه با استفاده از مدول‌های پیش ساخته است. در انگلستان، در دهه‌ی 1950 دنینگ آف چارد² سیستم سقف فضایی³ را بر اساس مدول‌های هرمی فولادی پیش ساخته که به یکدیگر پیچ می‌شوند (با ابعاد 1.22×1.22 متر)، توسعه داد. با اندکی تغییرات در ابعاد مدول‌ها و مصالح، سیستم سقف فضایی به صورت گسترده و موفقیت آمیز برای سازه‌های کف و بام مورد استفاده قرار گرفت. یک مدول مشابه با همان ابعاد در پلان ولی ارتفاع کل 600 میلیمتر، برای ساخت بام و کف در سیستم ساختمانی مدولار ننگ⁴ به کار برده شد. [25]

شبکه‌های فضایی موجب آزادی عمل در مورد محل قرار گیری ستون‌ها می‌شوند و امکان طراحی به نحو مورد نظر در فضاهای وسیع بدون ستون را فراهم می‌سازند. شایان ذکر است که دال‌های بتنی پیش‌ساخته بر روی نوارهایی از پلی‌استایرن یا پلی‌یورتان، درون شبکه مدولار مربع شکلی که در قسمت فوقانی تعبیه شده قرار می‌گیرند و صفحات کف را تشکیل می‌دهند.

¹ - Dr ing. Max Mengerlinghausen

² . Dening of Chard

³ . Space Deck

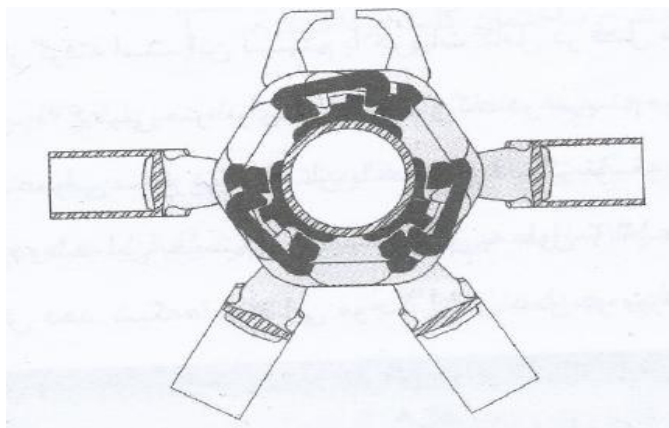
⁴ . Nenk

در دهه ی 1950 و 1960 ، سیستم‌های سازه‌ی فضایی در تمام دنیا مورد استفاده قرار گرفت، چرا که معماران به زیبایی جدید این شبکه‌های مدولار پی بردند و مهندسين با گزینه‌های مختلف برای اتصال اجزا به یکدیگر انواع مصالح و اشکال هندسی متفاوت را با کمک این سیستم آزمایش کردند. در آمریکا ریچارد با کمینستر فولر¹ (1895-1981) در پی مطالعاتی که در مورد نحوه اتصال تعدادی از کره‌ها به یکدیگر انجام داد، به سیستم خرپای هشت وجهی دست یافت.[26]

کنراد واچسمان² در سال 1959 برای توسعه یک سیستم شبکه فضایی در دهانه بزرگ برای آشیانه هواپیما توسط نیروی هوایی آمریکا دعوت شد. خلاصه‌ای از خواسته‌های طرح عبارت بودند از : انعطاف پذیری در ساخت، هندسه و نوع ساختمان. در عین حال در خواست شده بود که اجزا باید قابل استفاده مجدد به همان شکل یا اشکال متفاوت باشند. سیستم واچسمان از مجموعه‌ای از اتصالات عمومی نسبتاً پیچیده که از ترکیب چهار عضو آهنی استاندارد که امکان اتصال 20 عضو لوله‌ای را در هر گره فراهم می‌ساخت، تشکیل شده بود (شکل 3-4) . دو نوع لوله با دو قطر مختلف به کار گرفته شده بودند، یک نوع برای اعضا ممتد فوقانی و تحتانی شبکه به طول 9.1 متر، با اتصالات هم سطح و نوع دیگر (لوله‌های با قطر کوچکتر) برای اعضای قطری به کار برده شدند. اتصال بین اعضای اصلی و اعضای قطری به صورتی طراحی شده بودند که در محل، فقط یک چکش برای نصب آن‌ها لازم باشد . فقط باید سه لبه‌ی فولادی صاف از شیارها عبور می‌کرد تا اتصالات در موقعیتی مناسب روی اعضای اصلی قفل شوند.[۲۷]

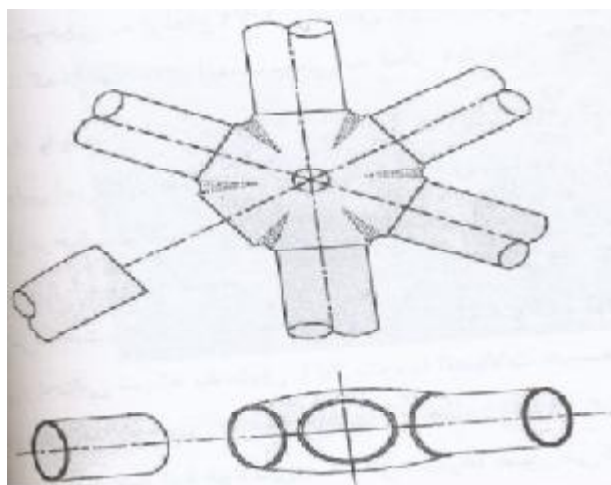
¹ - Richard Buckminster Fuller

² - Konrad Wachsmann



شکل 3-4: اتصال عمومی کنراد و اچسمان

در فرانسه استفان دوشاتیو سیستم سه وجهی اس. دی. سی¹ را توسعه داد (1975). این سیستم به جوش دادن اعضای لوله ای به اتصالات در کارگاه نیاز داشت (شکل 3-5) در همان زمان دوشاتیو سیستم دیگری را با استفاده از مدول های هرمی با قاعده مثلث، مربع یا شش ضلعی به نام پیرامیتک² توسعه داد. [28]



شکل 3-5: سیستم سه وجهی اس. دی. سی

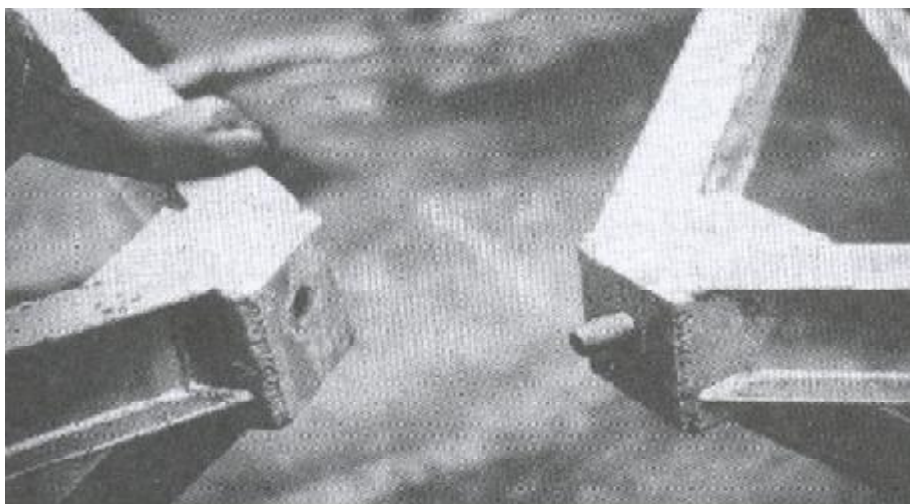
این سیستم مقدمه ای برای عرضه سیستم یونی بات³ بود (1962، شکل 3-6) که از مدول های مشابهی تشکیل می گردید ولی در این سیستم مدول ها فقط در گوشه ها به یکدیگر پیچ

¹ - Tridirectionelle S.D.C

² -Pyramitec

³ - Unibat

می‌شدند. دوشاتیو همچنین سیستم تری دیماتیک¹ را توسعه داد (1965). این سیستم، متشکل از خرپاهای مسطح پیش ساخته و سیستم اسفیروبات² (1984) گره های کروی تو خالی دو قسمتی بود که اعضای لوله‌ای در انتها از طریق پیچ‌ها به این گره‌ها متصل می‌شدند. [29]



شکل 3-6: مدول‌های هرمی سیستم یونی‌بات که در گوشه‌ها به یکدیگر جوش می‌شوند.
در کشور کانادا برای سیستم تریودتیک³، از آلومینیوم به عنوان مصالح اصلی برای ساختن اعضا و گره‌ها استفاده می‌شود. این سیستم به صورت تجاری در سال 1960 توسط فنتیمان بروس⁴ از اوتاوا، انتاریو، در کانادا عرضه گردید [30]. که دارای اعضای لوله‌ای اکستروود شده با انتهای مسطح یا تخت بود و در گره‌ها استوانه‌ای آلومینیومی توپر با سوراخ‌هایی بر مخروط انتهایی لوله‌ها ابداع شده بود (شکل 3-7)

¹ - Tridimatic

² - Spherobot

³ - Triodetic

⁴ - Fentiman Bros



شکل 3-7: سیستم ترپودتیک

ارائه طرح‌های جدید ریچارد باکمینستر فولر و رشد قابل انتظار سازه‌های مشبک فضایی سبب بوجود آمدن ساختمان سه ربع کره‌ای به قطر 76 متر به صورت گنبد ژئودزیک برای غرفه آمریکا در نمایشگاه اکسپو 67 مونترال، کانادا شد. این غرفه توسط فولر و با همکاری شرکت سادائو¹، ژئومتریکس² و سیمپسون، گامپرتز و هگر³ طراحی شد. گنبدها یک شبکه اتصالی دولایه از لوله‌های فولادی بودند که شبکه ژئودزیک مثلثی برای لایه خارجی و یک شبکه‌ی شش ضلعی برای لایه داخلی داشتند (شکل 3-8).

¹ - Sadao

² - Geometrics

³ - Simpson, Gumpertz and Heger



شکل 3-8: سازه‌ی سه چهارم کره‌ای باکمینستر فولر به قطر 76 متر

با استفاده بیشتر از کامپیوترها و توسعه برنامه‌هایی که قادر بودند سازه‌های مشبک فضایی را تحلیل کنند، تاثیر زیادی در افزایش استفاده از آنها برای دهانه‌های بزرگتر و طول‌تر داشت. به دلیل کارآمد نبودن برنامه‌های کامپیوتری متداول در آن زمان برای تحلیل سازه‌های فضاکار موجود، برنامه کامل و جدیدی درباره هندسه و شکل فضایی بزرگ نوشته شد که می‌توانست به منظور تحلیل شبکه‌های چند لایه پیرامید و ولکانو به کار رود.

در اوایل دهه 1970، بسیاری از اولین نمونه‌های سیستم‌های شبکه فضایی با نسل دوم چنین سیستم‌هایی جایگزین شدند. بخش لوله‌های شرکت فولاد انگلیس که امروزه به نام لوله‌ها و میله‌های فولادی انگلیسی¹ شناخته می‌شود، سیستم نودوس (NODUS) را با دامنه کوچکی از گره‌های اتصال استاندارد که متناسب با مقاطع لوله‌های تولیدی با اندازه‌های مختلف و ظرفیت‌های باربری متنوع، طراحی کرد. تمام اتصالات استاندارد برای شکست در شرایط خاص، در مرکز تحقیقات شهر کربی برای اثبات میزان موثر بودن، آزمایش شدند.

¹ - British Steel Tubes & Pipes

برای برگزاری بازی‌های المپیک در مکزیکوسیتی در سال 1968، معماران فلیکس کاندلا¹ و آنتونی‌پری² و کاستنادا تمبورل³ یک فضای ورزشی با گنبدی مدور با پوشش مسی طراحی کردند. سازه‌ی آن مجموعه‌ای از خرپاهای قوسی متقاطع در راستاهای عمود بر هم بود که یک شبکه‌ی فضایی دو لایه با انحنای مضاعف به دهانه 132 متر را به وجود می‌آورد [31]. نمونه‌های قابل توجهی از شبکه‌های فضایی با دهانه‌های بزرگ در سال‌های 1970 و 1973 ساخته شدند که از آن جمله می‌توان به آشیانه‌های هواپیمای خطوط هوایی انگلستان در فرودگاه هیثرو لندن که توسط زد.اس.ماکوفسکی⁴ و همکاران طراحی شده بود، اشاره کرد [32]. سقف آشیانه شبکه دو لایه قطری به ارتفاع 3.66 متر بود که فضایی به مساحت 67*138 متر در پلان را بدون ستون پوشش می‌داد.

در دهه‌ی 1980 کاربرد مقاطع ممتد از فولاد با نورد سرد برای اعضای فوقانی و تحتانی در خرپاهای فضایی بدون گره موجب توسعه‌ی سیستم‌های سبک‌تر و ارزان‌تری مانند سیستم هارلی⁵ شد که در ابتدا در استرالیا به کار رفت. این سیستم می‌توانست با قاب‌های باربر پایدار در ساختمان‌های با دهانه‌های متوسط رقابت کند. در این نوع شبکه‌ی فضایی، اعضای ممتد در دو جهت عمود بر هم با مقاطع C شکل که پشت به پشت در گره‌ها به یکدیگر پیچ شده‌اند، واقع می‌شود.

در دهه‌ی 1980 و اوایل 1990، قاب فضاکار کیوبیک (CUBIC) و شبکه (SPACE) و سیستم شبکه‌ی فضایی کاندل هالی (Conder Harly) در انگلستان شناخته شد. و به صورت قاب فضاکار

¹ - Felix Candela

² - Antoni Peyri

³ - Castenda Tamborrel

⁴ -Z.S.Makowski & Associates

⁵ -Harley

مدولار، که توسعه یافته سیستم خرپای فضایی یونی‌بات و نمونه اصلاح شده سیستم خرپای فضایی هارلی استرالیایی است، ارائه شد. که در فصل بعدی به طور کامل شرح داده می‌شود. در این بخش به همین مقدار از بازنگری تاریخ توسعه سازه‌های فضایی بسنده می‌کنیم.

3-3 تعریف سازه‌های فضاکار

با استناد به گزارشی که در رابطه با "وضعیت موجود سازه‌های فضاکار" توسط انجمن بین‌المللی پوسته‌ها و سازه‌های فضاکار (IASS) در سال 1984 انتشار یافت [33]، می‌توان تعریف زیر را برای این سازه‌ها پذیرفت:

« یک سازه فضاکار را می‌توان بصورت یک سازه‌ای در نظر گرفت که از اعضای خطی تشکیل شده است و طرز قرار گیری آن‌ها به گونه‌ای است که بارها به صورت سه بعدی منتقل می‌شوند. در بعضی موارد، عناصر سازنده ممکن است دو بعدی نیز باشند. یک سازه فضاکار اغلب شکل سطحی صاف یا منحنی گونه بخود می‌گیرد.»

در گزارش انجمن مهندسان راه و ساختمان آمریکا با عنوان "وضعیت موجود" سازه‌های شبکه‌ای انتشار یافته در سال 1976، سازه‌های فضاکار به عنوان دسته‌ای از سازه‌های شبکه‌ای معرفی و به صورت زیر تعریف شده اند: [34]

« یک سیستم سازه‌ای به صورت مجموعه‌ای از عضوهای به هم پیوسته است (نه به صورت یک صفحه پیوسته). ویژگی دیگر سازه‌های شبکه‌ای این است که مکانیزم انتقال بار توسط آن‌ها 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 حالی که واژه قاب‌های فضایی مخصوص سازه‌هایی است که اتصالات صلب دارند. در این مقاله، بر اساس گزارش گروه مهندسان IASS (سازه‌های فضاکار) به عنوان یک واژه کلی به کار رفته است، و خرپاهای فضایی، تنها یکی از زیر مجموعه‌های آن به حساب می‌آید.

به این ترتیب سازه‌های فضاکار از نظر رفتار سازه‌ای مانند پوسته‌ها هستند. این شباهت‌ها را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

✓ بارهای وارد شده بر سازه عمدتاً توسط نیروهای محوری با خمش کم یا بدون خمش تحمل می‌شوند.

✓ به دلیل سختی ذاتی، تغییر مکان‌ها کوچک هستند.

✓ هر دو دارای فرم‌های سازه‌ای مناسبی می‌باشند و استفاده از مصالح را بهینه می‌کنند.

به دلیل این شباهت‌های نزدیک در رفتار سازه‌ای، تحلیل مقدماتی سازه‌های فضایی را می‌توان اغلب با جایگزینی سازه فضایی با یک پوسته یا صفحه‌ی معادل انجام داد.

3-4 مزایای سازه‌های فضاکار:

بدین ترتیب امروزه بحث در مورد سازه فضاکار یکی از مهمترین دغدغه‌های مهندسين سازه می‌باشد. کاربرد این سازه‌ها روز به روز در حال افزایش است که دلایل آن را می‌توان در موارد زیر جستجو کرد:

1. سازه‌های فضایی سبک هستند. بنابراین بارهای مرده، بسیار کوچک بوده و در نتیجه، در ستون‌ها و سایر اعضا صرفه جویی می‌شود.

2. پیدایش رایانه‌های قوی و نرم افزارهای پیشرفته طراحی این سازه‌ها را بسیار راحت‌تر کرده است.
3. استقبال معماران به دلیل آزادی در طراحی این سازه‌ها، به عنوان مثال برای تعیین محل تکیه‌گاه‌ها و طراحی زیر مجموعه‌های فضای سرپوشیده.
4. عکس العمل بسیار خوب در برابر زلزله
5. پوشش ساده دهانه‌های بزرگ بدون استفاده از بتن
6. به دلیل سختی زیاد این سازه‌ها، تغییر مکان‌ها کوچک است. این ویژگی در کاربرد سازه‌های فضایی به عنوان پشت بند برای آنتن‌های بشقابی سهموی، آنتن‌های چند بشقابی و تلسکوپ‌ها حائز اهمیت است. زیرا این سازه‌ها علاوه بر سبکی، نیاز به صلبیت بالایی دارند.[35]
7. از آنجا که سازه‌های فضاکار با در کنار هم قرار دادن اجزای دقیق کارخانه‌ای ساخته می‌شوند، کارگر غیر متخصص هم می‌تواند در مونتاژ و اجرای آن‌ها به کار گرفته شود.
8. 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 می‌شود.
9. زمان ساخت سازه‌های فضایی کوتاه است، زیرا اجزای آن‌ها در کارخانه تولید می‌شوند و پس از حمل به کارگاه به راحتی نصب می‌شوند.
10. هر کدام از اجزای سازه سبک بوده و این امر حمل و نقل ساده آن‌ها را ممکن می‌سازد.

3-5 سیستم‌های سازه‌های فضاکار

بدون اغراق، امروزه صدها سیستم شبکه فضایی مختلف از زمانی که اولین نمونه‌ی آن‌ها در 50 سال قبل به صورت تجاری مطرح شد، توسعه یافته است. در سرتاسر جهان، همه ساله سیستم‌های جدیدی به بازار عرضه می‌گردند. از این میان برخی فقط یک بار یا برای تعداد محدودی از پروژه‌ها تا قبل از نابودی به کار رفته‌اند. تقریباً تمامی این خرپاهای فضایی دارای اعضای مهاری جان به صورت قطری در بین لایه‌های شبکه خود می‌باشند. سیستم‌های سازه‌ای فضاکار تجاری، به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

1. سیستم‌هایی که از اعضای که ما بین گره‌ها قرار دارند، تشکیل شده‌اند و اغلب به سیستم‌های قطعه کوچک معروفند.

2. سیستم‌هایی که از اعضای ممتد تشکیل می‌شوند.

3. سیستم‌هایی که از مدول‌های پیش ساخته کارخانه‌ای تشکیل شده‌اند.

در ادامه مثال‌هایی از برخی سیستم‌ها که به صورت تجاری در دسترس‌اند، آورده شده است تا تنوع تولیداتی که در دست طراحان است نشان داده شود.

3-5-1 سیستم‌های "قطعه کوچک"

سیستم‌های قطعه کوچک در روش متفاوت هستند. برای اعضای این سیستم‌ها بیشتر از لوله‌هایی با مقطع مربع و دایره تو خالی و به دلیل عملکرد بهتر آن‌ها در مقاومت در برابر نیروهای داخلی خرپاهای فضایی استفاده می‌شود (در حالت عادی، نیروهای محوری خالص به صورت فشاری و کششی به علاوه کمی آثار خمشی ثانویه می‌باشد). اعضای لوله‌ای، زیبایی ظاهری هم دارند. این مسئله به ویژه زمانی که شبکه‌های فضایی بدون پوشش رها می‌شوند تا دیده شوند و

کاربران ساختمان می‌توانند الگوی هندسه‌ی منظم شبکه را تصدیق کنند، برای معماران اهمیت بسیاری دارد. تفاوت اصلی اعضای لوله‌ای در سیستم‌های مختلف مربوط به جزئیات اتصال انتهایی آن‌ها در گره‌ها است. در بیشتر انواع آن‌ها قطعات اضافی زیادی برای اعضای لوله‌ای وجود دارد. برای مثال در سیستم KK مرو (MERO) این قطعات به صورت فرم مخروطی، در سیستم نودوس (NODUS) به صورت دنده‌های ریخته شده صلب و یا در خرپای فضایی KT به صورت سرپوش و ورقه‌های اتصال می‌باشند. این قطعات اضافی به انتهای اعضای لوله‌ای از پیش بریده شده جوش می‌شود. در سیستم‌های دیگر در اغلب موارد انتهای خود لوله با پروفیل ساده یا چین دار اصلاح می‌شود (به طور مثال تریودتیک¹). این نمونه‌ها سیستم‌های سبک وزنی از قبیل یونی استرات / موداسپن² هستند که از مقاطع ناودانی و به صورت سرد شکل گرفته و خم شده برای تنظیم اتصال خود در انتها، سوراخ‌های مهارتی تعبیه شده‌ای دارند. تفاوت ظاهری سیستم‌های "قطعه کوچک" در شکل گره‌ها و روش اتصال در گره‌ها می‌باشد. چنین تفاوت‌های زیادی در سیستم اتصالات اعضا (برای مثال، گره‌های "تویی"، گره‌های تو خالی در مقاطع ورق‌ها و ...) نشان دهنده دشواری دستیابی به یک اتصال زیبا و ساده است.

ژوب گریتس³ از تی. یو دلف با مطالعه در مورد جزئیات سیستم گره‌های اتصالی، آن‌ها را بر اساس نوع گره‌ها دسته‌بندی کرده است. گره‌های مختلف سیستم خرپای فضایی "قطعه کوچک" که در این قسمت بیان شده بر اساس پیشنهاد وی ارائه شده است و بی‌گمان به زیر تقسیمات بیشتری در گره‌ها نیاز دارد. این گره‌ها عبارتند از:

¹ .Triodetic

² . unistrut/moduspan

³ - Joop Gerrits

1. گره‌های کروی

الف. توپر

ب. تو خالی

2. استوانه‌ای

3. منشوری

4. ورقه‌ها

5. بدون گره

3-5-1-1-1 گره‌های کروی

گره‌ها بر اساس کره‌هایی که احتمالا بیشترین مطلوبیت را از نظر زیبایی دارند، شکل گرفته اند. بسته به شکل اعضای مجاور، آن‌ها می‌توانند ظاهر بسیار واضح و منظمی را در شبکه به وجود آورند. این گره‌ها می‌توانند به زیر گروه‌های بیشتری از جمله نوع توپر و توخالی تقسیم شوند.

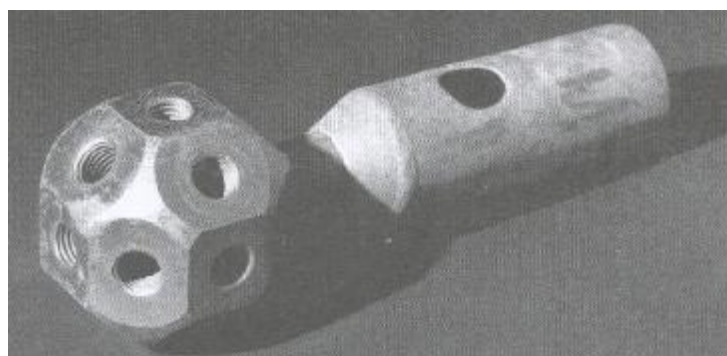
3-5-1-1-1-1 گره‌های کروی توپر

کره‌های توپر از فولاد برای اتصال اعضای مجاور استفاده می‌شود، کره‌ها سوراخ شده و با حفره‌های دندان‌دار در زوایای مناسب آماده می‌شوند. توجه شود که سطح کره نیز برای اعمال بار صاف می‌شود تا سطح باربر خوبی را دارا باشد. اتصال هر عضو اغلب با یک پیچ، فقط در محور مرکزی آن برقرار می‌شود در حالی که در برخی سیستم‌ها انتهای اعضا ارتباط مستقیم با گره‌ها دارند.

در صورتی که اتصال توسط یک پیچ انجام شود، نیروهای محوری فقط از طریق پیچ‌های اتصال منتقل می‌شود و این امر در طراحی اتصال بسیار حائز اهمیت است. از آنجایی که سیستم مرو در بین این نوع سیستم‌ها جامعیت بیشتری دارد به شرح آن می‌پردازیم.

سیستم kk مرو (MERO)

سیستم خرپای فضایی kk مرو، اولین سیستم تجاری رایج می‌باشد. که هنوز به عنوان یکی از زیباترین راه حل‌های ساخت برای سازه‌های شبکه‌ی فضایی مورد توجه است. زیبایی و سادگی سیستم مرو موجب شده که نه تنها در ساختمان‌ها، بلکه در برپایی نمایشگاه‌ها و فضاهای تجاری نیز با استفاده از مصالح سبک وزن به کار رود. اعضای لوله‌ای شکل با مقطع دایره توسط یک پیچ پنهان برای هر لوله به گره‌های توپی ریخته شده، متصل می‌شوند. این ایده از مطالعات سازه‌های طبیعی که در دهه 1930 توسط سیستم اصلی دکتر مکس منگرینگ هاوسون انجام شده بود، توسعه یافت. بررسی‌های او بر روی سازه‌های طبیعی باریک ولی مقاوم نشان داد که چگونه آن‌ها قدرت خود را توسط مقاطع عرضی لوله‌ای و با استفاده از گره‌هایی که در فواصل منظم در امتداد طولشان وجود دارد، به دست می‌آورند. (شکل 3-9) نام مرو که امروز به عنوان یک سیستم مشهور شناخته می‌شود از مخفف نام اصلی منگرینگ هاوسون روهرباویس¹ گرفته شده است.



شکل 3-9: گره استاندارد سیستم kk مرو با سوراخ دنداندار

¹ - Mangering hausen Rohrbauweise

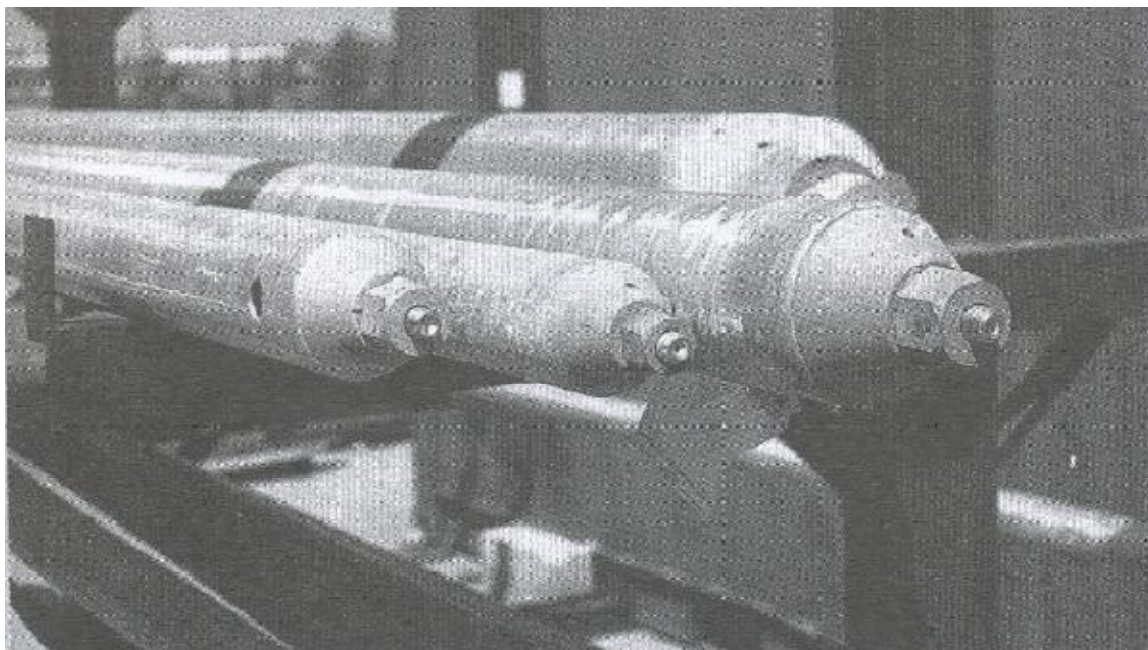
این سیستم در ابتدا به عنوان سیستمی بر پایه‌ی مدول‌های ثابت شده تصور می‌شد. خرپای فضایی مرو یک گره اتصالی کلی و مجموعه‌ای از اعضا با طول استاندارد که از یک متر شروع شده و با ضریب $\sqrt{2}$ مابین اندازه‌ها به ترتیب ادامه می‌یابد (به طور مثال $1/$ و $1/41$ و $2/0$ و $2/82$ و ..).

افزایش طول اعضا از یک گره مرکزی که فرمی کروی دارد، منشعب می‌شود و همان‌طور که منگرینگ اشاره کرده، تقلیدی از رشد مارپیچی پوسته حلزون است (شکل 3-10). هر چند اکنون انواع مختلفی از اتصالات گره‌های سیستم مرو برای بخشی از تقاضاها در دسترس است، ولی اعضا در شبکه‌های فضایی یک لایه و دو لایه، برای طول‌های مورد نیاز ساخته می‌شوند.

گره‌های "تویی" اصلی، در حال حاضر به عنوان سیستم kk شناخته می‌شوند، که عبارت از یک کره فولادی توپر با 18 سوراخ دنده‌دار شده و سطح برابر ماشین‌کاری شده در زوایای 45، 60 و 90 درجه نسبت به سایر سوراخ‌هاست (شکل 3-9). گره‌های استاندارد در محدوده‌ای از اندازه‌های استاندارد برای انتقال نیروهای اعضای شبکه با بزرگی مختلف تولید می‌شوند. گره‌های با سوراخ‌های کمتر، برای کاربردهای معمول از قبیل گره‌های تکیه گاهی استاندارد تولید می‌شوند.



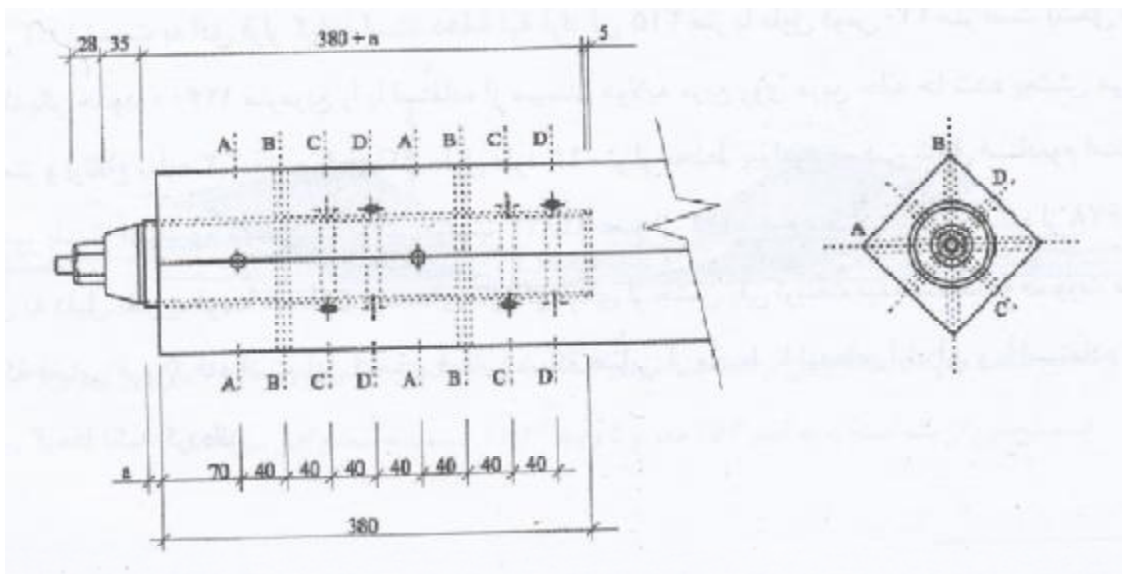
شکل 3-10: مقایسه یک سیستم سازه‌ای با رشد در طبیعت. مقطع یک پوسته حلزونی



شکل 3-11: اعضای استاندارد مرو

با کامپیوترهای مدرن دقت روش‌های سوراخ‌کاری افزایش یافته است. در این حالت سوراخ‌ها می‌توانند در هر زاویه مورد نیاز در مقایسه با زوایای استاندارد موجود ایجاد شوند، اگرچه زاویه حداقلی به میزان 35 درجه بین سوراخ‌های مجاور مورد نیاز است. این توانایی در ایجاد سوراخ‌های دندانه‌دار در زاویه‌های غیر استاندارد، انعطاف بیشتری را به طراح در انتخاب هندسه شبکه‌ی فضایی می‌دهد.

اعضای استاندارد، مقاطع دایره‌ای تو خالی از لوله‌های فولادی (یا آلومینیومی) هستند که به صورت مقاطع مخروطی باریک شده و در انتها جوش شده است (شکل 3-11) در هر مخروط یک پیچ و مهره اتصالی با سوراخ شکاف‌دار و یک میخ وجود دارد تا پیچ بتواند بچرخد و کاملاً سفت شود. برای حفاظت در برابر خوردگی، لوله‌ها از داخل و خارج گالوانیزه می‌شوند و پوشش آن‌ها شامل پودر پلی‌استر پوشش دهنده یا دو قسمت یوروتان است. سیستم هولز مرو از اعضای از جنس چوب‌های لایه لایه تشکیل شده که در انتها دارای لوله‌های کوتاه فولادی برای اتصال به گره‌ها می‌باشد (شکل 3-12).



شکل 3-12: قطعات فلزی هولز (Holz)

اندازه‌ی پیچ‌های اتصال بین لوله‌ها و گره‌ها به نیروهای انتقالی بستگی دارد. نیروهای کششی مجبورند تا از مخروط انتهایی اعضا، توسط سطوح برابر داخلی مخروط، به پیچ‌ها انتقال پیدا کنند و سپس از طریق پیچ در حال کشش به رزوه‌های گره منتقل شوند. نیروهای فشاری نیز از طریق مهره‌های پیرامونی پیچ‌های اتصالی و توسط اتصال مستقیم سطوح برابر ماشین‌کاری شده و پیچ‌هایی که به صورت موثر فقط در موقعیت صحیح روی گره‌ها واقع شده‌اند، انتقال می‌یابند. شکل گره‌های کروی، خط عمل تمام نیروهای اعضاست که در مرکز گره به هم برخورد می‌کنند. بنابراین این هیچ‌گونه خروج از مرکزی برای ایجاد خمش در لوله‌هایی که در ابتدا نیروهای محوری فشاری و کششی را حمل می‌کنند، وجود ندارد.

جداول سازندگان برای نشان دادن ارتباط بین گره و لوله‌ها و ظرفیت پیچ‌های اتصالی، در دسترس است. اساساً خرپاهای فضایی مرو با استفاده از گره‌های اتصال استاندارد متفاوت، بسته به نوع قیدهای مورد نیاز، طراحی می‌شوند.

از سیستمی که بیش از 50 سال استفاده می‌شود، انتظاری وجود دارد و آن اینکه در تمام جهان، هزاران مثال از شبکه‌های فضایی مرو چه کوچک و چه بزرگ موجود است. امروزه

مقاطع عرضی اعضا و گره های مختلفی برای تقاضاهای مختلف مانند پوشش شیشه ای واقع بر روی شبکه های تک لایه ی گنبد های شبکه ای وجود دارد. یکی از رویایی ترین کاربرد سیستم مرو برای سقف تماشاچیان در استادیوم اسپلیت¹ است (شکل 3-13). این ورزشگاه در سال 1978 در یوگسلاوی سابق (کرواسی کنونی) ساخته شد.



شکل 3-13: استادیوم اسپلیت

سقف های آن بخش هایی از استوانه ای به قطر 452 متر است که با زاویه 11.2 درجه نسبت به افق قرار گرفته است. دهانه ی لبه ی آزاد آن 215 متر با طول قوس 220 متر است (شکل 3-14) . دو قسمت شبکه فضایی با یکدیگر حدود 13600 متر مربع با استفاده از سیستم دو لایه مربع روی مربع جابه جا شده پوشش می دهند. اندازه ی شبکه ها 3.0*3.0 متر و ارتفاع سازه 2/3 متر و با حداکثر طول طره 45 متر از محیط پیرامونی بیضی شکل استادیوم است. دو ناحیه ی سقف فقط در طول محور بلندتر استادیوم متقارن اند، به این ترتیب 12832 عضو از 1143 نوع مختلف و 3460 گره از 1678 نوع گره، وجود دارد (839 شکل به دلیل تقارن قرینه شده اند) . دنده های تاق

¹ - Split

گهواره‌ای از جنس پلی‌کربنات نیمه شفاف به صورت موازی بر روی اعضای فوقانی شبکه‌ی فضایی قرار گرفته است. این اعضای فوقانی شبکه‌ی فضایی از محیط تا لبه‌های آزاد آن و با استفاده از قاب‌های ثانویه‌ای فقط بر روی گره‌ها تکیه کرده‌اند.



شکل 3-14: سقف جایگاه تماشاچیان در استادیوم اسپلیت

هم اکنون در جهان سیستم‌های خرپای فضایی متعددی بر اساس ایده گره‌های توپی ریخته‌گری و اعضای لوله‌ای مانند تی.ام.تراس¹ که توسط شرکت تایو کوگیو² در ژاپن ای.بی.بی.ای اسپیس³ که توسط سازه‌های فضایی ای.بی.بی.ای در آفریقای جنوبی تولید می‌شود، وجود دارند. تفاوت اصلی این سیستم‌ها در روش اتصال بین انتهای لوله و گره‌های توپی است.

¹ - TM Truss

² - Taiyo Kogyo

³ - ABBA Space

3-5-1-1-2 گره‌های کروی تو خالی

گره‌های کروی تو خالی دو نوع اصلی دارند. تعدادی به صورت تو خالی و ریخته شده و تقریباً گره‌های کاملی هستند که در آن‌ها سوراخ‌هایی در جاهای از قبل تعیین شده، ایجاد می‌گردد. مانند اسفروبات در فرانسه، ان.اس.تراس در ژاپن، تیوبال در هلند و اوربیک در انگلستان. اما بقیه از دو نیم کره فولادی فشرده با یا بدون صفحه میانی مرکزی تشکیل شده اند مانند اس.دی.اس¹ در فرانسه، اوکتاپلایت در آلمان، وستارت در ایتالیا و نودوس در انگلستان.

در نوع اول پیچ‌های اتصالی از راه یک سوراخ دسترسی داخل شده و از داخل کره به اعضای مجاور پیچ می‌شوند. سوراخ دسترسی ممکن است با یک پوشش بسته شود. در حالت دوم، وسایل مختلفی برای اتصال اعضا وجود دارد. برای مثال، در سیستم وستارت از دو بخش نیم کره نزدیک به هم و صفحات میانی برای نگه داشتن اتصالات T شکل تو پر که به انتهای اعضا جوش شده، استفاده می‌شود. در بین این نوع از گره‌ها به شرح سیستم نودوس می‌پردازیم.

سیستم نودوس²

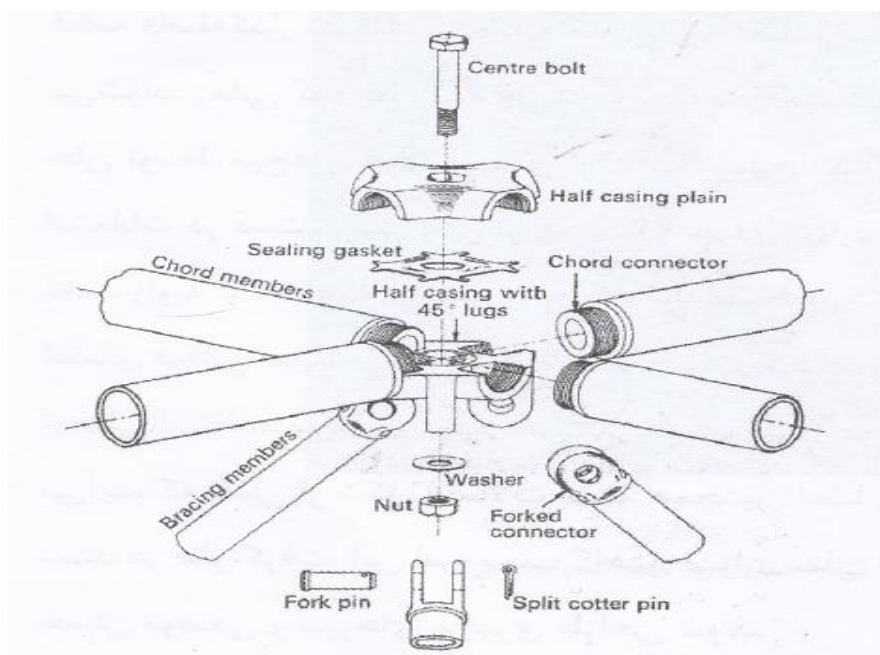
سیستم نودوس یک خرپای فضایی از سیستم قطعه کوچک است که در اواخر سال 1960 توسط تقسیمات لوله‌های یک شرکت فولاد انگلیسی توسعه یافت و در اوایل سال 1970 به صورت تجاری معرفی و از سال 1985 توسط شرکت اسپیس‌دک خریداری شد. در طول زمان توسعه سیستم، مجموعه‌ای از گره‌های استاندارد به آن اضافه شد. نمونه‌هایی از هر اندازه و نوع برای تعیین مقاومت لازم در مرکز تحقیقات فولاد انگلستان در کربی آزمایش شدند.

¹.SDS

².NODUS

دو سری از آزمایش‌ها انجام شد و گره‌ها به منظور بهبود عملکردشان پس از اولین سری آزمایش‌ها اصلاح شدند. دومین سری برای تثبیت و تکمیل پیشرفت، آزمایش مقاومت انجام گرفت. در پی آزمایش‌های بعدی یک شبکه‌ی فضایی کامل به ابعاد $30/5 * 30/5$ متر به ارتفاع $1/52$ متر توسط یک شرکت مستقل برای اثبات سهولت ساخت، تولید و نصب شد.

آزمایش بارگذاری به میزان $1/8$ کیلو نیوتن بر مترمربع (معادل بار مرده‌ی طراحی به علاوه $1/5$ برابر بار اضافی) برای مدت 24 ساعت مطابق با استاندارد رایج سازه‌های فولادی انگلستان (BS 449) بر روی سازه انجام شد. اندازه‌گیری کرنش باقی مانده پس از آزمایش به میزان مطلوبی در محدوده مشخصات استاندارد بود.



شکل 3-15: گره‌های نودوس

گره‌های نودوس مجموعه‌ای از قطعات ترکیبی است (شکل 3-15). اتصالات انتهایی از نوع فولاد ریخته شده ویژه، به اعضای فوقانی و تحتانی و اعضای مهارى جان در کارخانه جوش شده تا از درستی اندازه‌های اعضای خرپای فضایی اطمینان حاصل شود. گره‌ها نیز خود از دو نیمه لوله، یکی مسطح و دیگری دارای انشعاباتی برای اتصال به اعضای مهارى جان، و یک قطعه فاصله گذار

تشکیل شده‌اند. تمامی این اعضا با استفاده از یک پیچ اصطکاکی با مقاومت بالا و واشر و مهره به یکدیگر متصل می‌شوند. زمانی که پیچ بسته می‌شود، دنده‌های انتهایی اتصالات اعضای فوقانی و تحتانی بین دو نیمه ی لوله محکم می‌شوند. اعضای جان توسط میخ‌های فولادی میان انشعاب انتهایی اتصالات مهارى به انشعابات روی گره‌های لوله ای متصل می‌شود. دو شکل از انشعابات در دسترس‌اند، یکی برای اتصالات اعضای مهارى بر روی خطوط شبکه‌های مشابه به عنوان اعضا و دیگری با اعضای مهارى تحت زاویه 45 درجه نسبت به اعضای شبکه . لوله‌ی مسطح یک تورفتگی شش ضلعی برای قرار گرفتن سر پیچ در حالتی که بالاتر از سطح اعضای فوقانی نباشد، دارد. بنابراین این امکان ثابت کردن پوشش سقف به صورت مستقیم بر روی اعضا، در حالتی که از قطعات مربع شکل تو خالی استفاده می‌شود، وجود دارد. در نتیجه صرفه جویی در مورد پرلین‌های ثانویه‌ای که ممکن است از این پس نیاز نباشد به وجود می‌آید ، که ناشی از شکل اتصالات است. همچنین اعضا را می‌توان برای خمش‌های موضعی در اثر بارهای پوششی سقف به صورت ممتد در نظر گرفت. این امر، سبب کاهش میزان ممان خمش در طراحی اعضا می‌شود. اما این اعضا باز هم باید برای ترکیبی از اثر خمشی موضعی و نیروهای محوری طراحی شوند.

برای اتصالات استاندارد (شماره های 24 و 30 و 35 و 45) بسته به ابعاد مقاطع اعضا، از نیمه لوله‌ها با اندازه‌های متفاوت استفاده می‌شود. کوچک‌ترین اتصال (شماره 24) برای مقاطع دایره‌ای تو خالی (CHS) به قطر 60/3 میلی‌متر و مقاطع چهار ضلعی تو خالی (RHS) به اندازه 60*60 میلی‌متر استفاده می‌شود. در حالی که اتصالات بزرگ (شماره 45) متناسب با مقاطع دایره‌ای به قطر 114/3 میلی‌متر و مقاطع چهار ضلعی 120*120 میلی‌متر است . مقاطع دایره‌ای (CHS) در اعضای مهارى کمترین اندازه را به میزان 42/4 میلی‌متر در تمامی گره‌ها دارند، در حالی که برای اعضای مهارى مستطیلی، حداقل اندازه 40 * 40 میلی‌متر است (به جز اتصال شماره 45 که کمترین اندازه 50*50 میلی‌متر است). حداکثر اندازه اعضای مهارى که می‌تواند با اتصالات استاندارد تطابق داشته باشد، قطر 60/3 ، 76/1 ، 88/9 میلی‌متر برای نوع (CHS) و 90 ،

80 ، 60 ، 50 میلیمتر برای نوع (RHS) است. اتصال مفصلی اعضای مهار، امکان تنوع در ارتفاع قاب فضایی، که توسط نیازها و کارایی سازه مشخص می‌شود را ایجاد می‌کند. نتیجه نهایی حاصل از هندسه‌ی گره‌هایی که در آن‌ها خطوط میانی اعضای مهار و اعضای فوقانی و تحتانی شبکه، در یک نقطه در گره یکدیگر را قطع نمی‌کنند، ممان‌های خمشی ثانویه کوچکی است که در محدوده‌ی شبکه تولید می‌شوند. زاویه‌ی کوچکتر بین اعضای مهار قطری و صفحه‌ی اعضا موجب بزرگتر شدن خروج از مرکزیت در نقطه‌ی تقاطع شده و در نتیجه ممان‌های ثانویه‌ی بزرگتر و کارایی شبکه کمتر می‌شود.

از آنجا که اتصالات فقط با انشعابات در دو جهت تولید می‌شوند، شکل‌های ممکن شبکه به انواع مربع روی مربع، مربع روی مربع جابه‌جا شده یا مربع روی مربع قطری محدود می‌شود. با این محدودیت هنوز ایجاد سازه‌هایی با انحنای کم، تاق‌های گهواره‌ای و گنبد با استفاده از اتصالات استاندارد امکان دارد. کاربرد سیستم نودوس در مرکز نمایشگاه ملی بیرمنگام انگلستان و سقف سالن سخنرانی و سایبان ورودی ترمینال 2 فرودگاه منچستر انگلستان به کار رفته است.

3-1-5-2 گره‌های استوانه‌ای

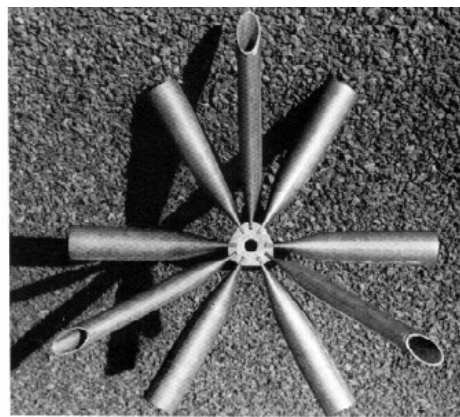
سیستم تریودتیک¹ از شناخته شده‌ترین گره‌های استوانه‌ای توپر است. این سیستم شامل یک مقطع آلومینیومی با شکاف‌های طولی برای انتهای چین دار اعضای لوله‌ای تو خالی شکاف دار است. این اتصال اعضا را در موقعیتی بین دو صفحه که توسط یک پیچ از مرکز گره عبور می‌کند، نگه می‌دارد. نوع مشابهی از گره‌های ساخته شده از فولاد نیز توسط سیستم تریودتیک به کار رفته است.

¹. Triodetic

سیستم ترپودتیک

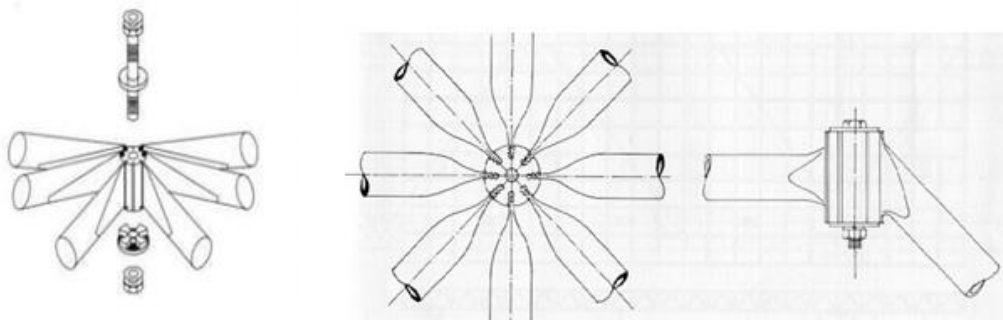
سیستم ترپودتیک شبکه های فضایی، یکی از انواع سیستم های قطعه کوچک است، با این تفاوت که ایده های متفاوتی را برای اتصال اعضای منفرد در گره ها به کار می برد. این سیستم در دهه ی 1950 توسط فنتیمان بروس از اوتاوا در کانادا ابداع شد و به صورت تجاری در سال 1960 معرفی شد.

مشکلات اصلی در شبکه های فضایی ناشی از عدم کارایی و سادگی در اتصالات اعضا به گره هاست. اتصالات تجربی گره ها بر اساس اتصال کام و زبانه است که در ساختمان های چوبی به کار می رود، اما این راه حل به صورت اتفاقی از مشاهدات اچ.جی.فیتیمان از تاثیر و کارایی گیره های فکی در ماشین ها، آزمایش های کششی به دست آمده است. او ثابت کرد که با تامین اتصال کامل بین اعضای لوله ای شبکه ی فضایی و اجزای گره، یک اتصال کارا به وجود خواهد آمد. صاف کردن (یا مخروطی کردن) لوله ها، در مصالح تغییری به وجود نمی آورد و بنابر این مقاومت مقطع عرضی ثابت باقی می ماند. این یکی از محدود سیستم هایی است که از آلومینیوم به عنوان مصالح اعضا و گره ها استفاده کرده است که از زمانی که استفاده از فولاد در کانادا محدود شد، رواج پیدا کرد. (شکل 3-16)



شکل 3-16: سیستم ترپودتیک

اعضای مدور کشیده شده یا لوله‌های جوش داده شده دارای انتهای چین‌دار خود هستند و با مقطع دوزنقه‌ای در زاویه‌ی مناسب برای اتصال با گره‌ها به کار می‌روند. در همان زمان، اعضا با طول دقیق و با خطایی در حدود 0/13 میلی متر بریده می‌شوند و گره‌ها (یا توپ‌ها) با مقطع استوانه‌ای و با شیارهای طولی برای دریافت انتهای چین‌دار اعضا ساخته می‌شوند (شکل 3-17). تمامی اعضا به درون شیارهای گره‌ها می‌رود و یک پیچ از مرکز سوراخ طولی عبور می‌کند و به صفحات نگه دارنده‌ی واقع در هر انتهای استوانه محکم می‌شود. این روش خیلی ساده‌ای برای نصب است، ولی به دقت زیادی در ساخت گره‌ها و اعضا نیاز دارد. در زمان رواج اولیه‌ی این سیستم، به علت خطا در فرایند تولید آلومینیوم استاندارد، توپ‌هایی با دقت لازم به وجود نیامد و از این رو روش بهتری برای تولید باید ایجاد می‌شد.



شکل 3-17: گره‌های تریودتیک

اگر چه این سیستم در اصل با لوله‌ها و توپ‌های آلومینیومی رواج یافت، ولی در مراحل بعدی از لوله‌های فولادی در ترکیب با توپ‌های آلومینیومی استفاده شد. با انتخاب صحیح مصالح و رنگ نهایی مناسب می‌توان از ترکیب فولاد و آلومینیوم بدون مشکلات معمول الکترولیتی بین فلزها استفاده کرد.

صفحات تخت یا فشرده، به عنوان اتصالات گره‌ها در سیستم‌های سبک وزن تشکیل شده از ناودانی‌های فولادی سرد نورد شده به کار می‌روند (برای مثال، یونی استارت اولیه که امروزه به عنوان موداسپین در آمریکا شناخته می‌شود). آن‌ها همچنین به عنوان اتصالات، در خرپاهای فضایی متشکل از چوب‌های مدور که توسط پیتر هایبرز در تی.یو دلف هلند ابداع شد، استفاده می‌شوند.

موداسپین¹، یونی استارت² سابق

موداسپین یک نوع متفاوت از خرپای قطعه کوچک است. سیستم نوع I فعلی تیپ رایج از این سیستم است که توسط چارلز دیبلوآت وود³ ابداع شده است. که در (شکل 3-18) نشان داده شده است. دو نوع از اتصالات گره‌ها که هر دو به صورت ورق‌های فولادی فشرده گرم نورد شده به ضخامت 6 میلی‌متر و دارای انشعابات برشی سوراخ شده با سوراخ‌هایی برای اتصال به اعضا هستند، وجود دارد. اتصالات "این استارت"⁴ در لایه بالایی شبکه به کار می‌رود و انشعابات دارد که به سمت نمایه داخلی سطوح قطری است.

در حالی که اتصالات "اوت استارت"⁵ در لایه تحتانی به کار می‌رود و انشعابات دارد که به سمت نمایه خارجی سطوح قطری است. اعضا مدول‌های استاندارد به طول‌های 1/22 متر و 1/52 متر دارند که گره‌ها را به یکدیگر متصل می‌کنند. اعضای مشابهی برای عضوهای فوقانی و تحتانی و قطری به کار می‌رود.

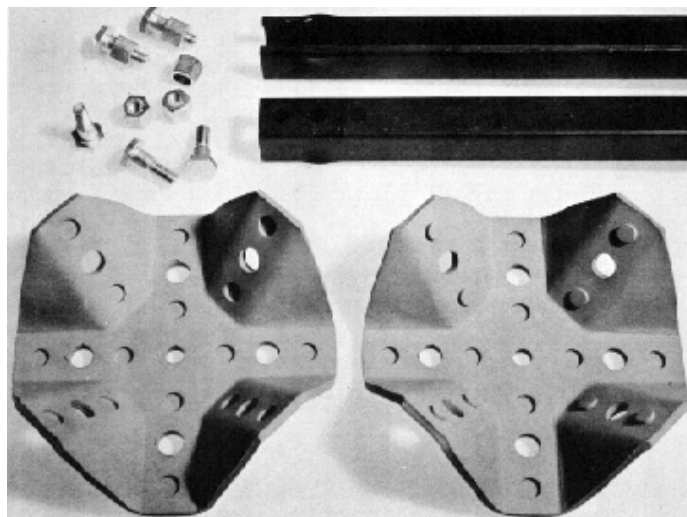
¹. Moduspan

². Unistrut

³ - Charles W. Attwood

⁴ - In-Strut

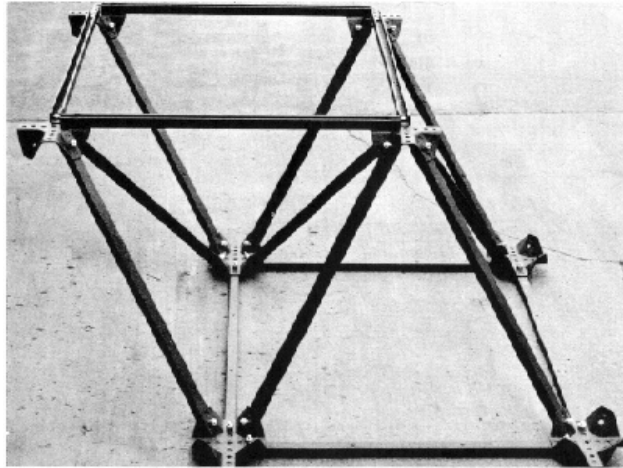
⁵ - Out-Strut



شکل 3-18: گره های سیستم مودا اسپن یا یونی استرات

این اعضا به شکل لوله هایی به اندازه ی 12 و ضخامت (0/27 میلی متر) از فولاد گرم نورد شده در یک مقطع ناودانی با لبه هایی به عرض 41/3 میلی متر پهنا و 41/3 یا 61/9 میلی متر ارتفاع، با سوراخ هایی نزدیک به انتهای اعضا برای پیچ هایی به منظور اتصال به گره ها و تامین اتصالات برشی است. دو اندازه استاندارد اخیر، یک پیچ از فولاد با مقاومت زیاد (با شانه ای برای عمل به عنوان یک انشعاب برشی) و یک مهره فولادی با سوراخ های خزینه دار (برای رسیدن به شانه پیچ ها) دارند.

به علاوه در این پنج جزء اصلی، میله های عمودی مسطح (برای مثال در مجاورت ستون ها) برای افزایش ظرفیت استاندارد، در محل بارگذاری زیاد وجود دارد، پایه های برابر برای انتقال بار از شبکه فضایی به تکیه گاه های سازه، از نیمی از اتصالات به عنوان پشتیبانی در برابر یک دیوار یا لبه انتهایی و .. استفاده می کنند (شکل 3-19) نمونه ای از کاربرد مودا اسپن یا یونی استرات برای سایبان ورودی در گنبد جورجیا آتلانتا است.



شکل 3-19: سیستم خریایی یونی استارت

3-5-1-4 اتصالات بدون گره

از آن جا که اجزای گره‌های خاص، اغلب بخش زیادی از هزینه‌ی شبکه فضایی را تشکیل می‌دهند، برخی سیستم‌ها این اتصالات را به طور کامل حذف و اتصال مستقیمی را بین انتهای اعضای شبکه ایجاد می‌کنند. اگرچه این امر هزینه‌ی کلی را کاهش می‌دهد، ولی به دلیل اینکه اتصالات انتهایی اعضا اغلب برای زوایای استاندارد بین اعضا طراحی شده‌اند، حذف این اتصالات منجر به محدود کردن اشکال ممکن برای شبکه‌های فضایی می‌شود. اوکتت تراس¹ که توسط باک مینستر فولر رواج پیدا کرد، اعضای با مقطع X و با انتهای بریده شده در زاویه مناسب در هندسه چهاروجهی و هشت وجهی (70/53 و 109/47) را به کار برده است.

در سیستم‌های چند مفصلی که در آمریکا توسط پیتربیرس² رواج یافت، صفحات بالدار با سوراخ‌هایی برای اتصال پیچ‌ها به اعضای لوله‌ای برای نصب اشکال از قبل تعیین شده، جوش می‌شود. یک مثال از کاربرد این سیستم در پروژه بیوسفر 2 در آریزونای آمریکا است.

¹. Octet Truss

² - Peter pearce

3-5-2 سیستم‌های با اعضای ممتد

این سیستم‌ها به عنوان مرحله میانی بین سیستم‌های "قطعه کوچک" و سیستم‌های مدولار می‌تواند در نظر گرفته شود. اگر چه آن‌ها از اجزای نسبتاً کوچک تشکیل شده‌اند، ولی دارای گروه‌های خاصی نیستند. سیستم‌های شبکه اسپیس¹ و یونی بات² که در بخش مدولار شرح داده می‌شود، تا حدی از اعضای ممتد برای لایه تحتانی شبکه استفاده می‌کنند، علاوه بر آن، سیستم‌های دیگری نیز وجود دارد که هم در اعضای فوقانی و هم در اعضای تحتانی از اعضای ممتدی در گره‌ها استفاده می‌کنند. این امر ممکن است به خروج از مرکزیت نیروهای اعضا در گره‌ها منجر شود که در نتیجه آن خمش‌های ثانویه در اعضا ایجاد می‌شود. با این حال، این سیستم دارای مزایایی است، از جمله اینکه: در این سیستم گره‌های گران قیمتی وجود ندارد، اجزای کمتری نیاز است و اعضا را می‌توان با وصله‌های ساده‌ای در محل بین تقاطع اعضا به هم وصل کرد.

3-5-2-1-2-5-3 هارلی / کاندرهالی³

سیستم هارلی در اروپا توسط گروه کاندر⁴ در سال 1989 معرفی شد. این سیستم تحت لیسانس کشور استرالیا ساخته شده و از سال 1980 در این کشور مورد استفاده قرار گرفته بود. پس از آزمایش‌های اولیه و ساخت سازه‌ی آزمایشی، این سیستم به عنوان رقیب قاب‌های مسطح سنتی برای ساختمان‌های صنعتی و انبارها در نظر گرفته شد. سری 80 سیستم خرپای فضایی کاندر هارلی برای سازه‌های با مساحت بیش از 250 متر مربع مناسب است.

¹.Space

².Unibat

³.Harly/Conder Harly

⁴ - Conder

تفاوت‌های اساسی بین این سیستم و دیگر سیستم‌های خرپای فضایی که در بالا توضیح داده شد، وجود دارد. اعضای اصلی از فولاد با نورد سرد به شکل ممتد ساخته شده و به طول‌هایی به میزان حداکثر 12/5 متر بریده شده‌اند. بنابراین، به طور معمول اعضای اصلی قبل از این که با یک گره اتصالی قطع شوند، از تقاطع اعضای قطری عبور می‌کنند. برای انجام این امر، اعضای اصلی در جهات عمودی در سطوحی نزدیک به افق قرار گرفته‌اند. برای مثال، اعضای اصلی با مقطع C شکل برای اجتناب از تقاطع مستقیم اعضا می‌توانند پشت به پشت قرار گیرند. اعضای مهاري جان، مقاطع لوله‌ای مدوری هستند که در هر انتها، خم ، به هم بسته شده و برای پیچ شدن به تقاطع اصلی سوراخ می‌شوند. یک فرم شناخته شده در شکل 3-20 نشان داده شده است.



شکل 3-20: گره‌های اتصال عمومی سری 80 هارلی

از آن‌جا که مرکز مقاطع اعضا به طور مستقیم از مرکز گره عبور نمی‌کند، هیچ یک از اعضا به صورت محوری رفتار نمی‌کنند. بنابراین خروج از مرکزیت در اتصالات سری 80 هارلی وجود دارد که در اعضای شبکه باعث تولید ممان‌های خمشی می‌شود. که با تقویت موضعی در گره‌ها این مشکل مرتفع می‌شود.

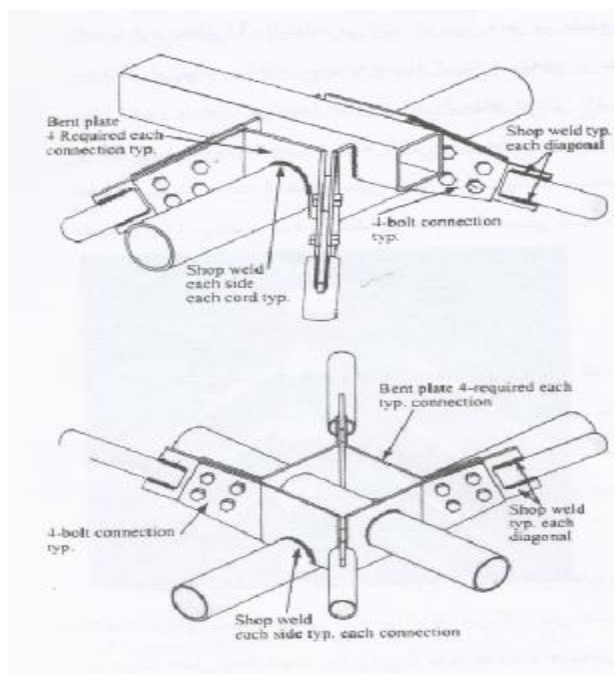
نوارهای ساخته شده با نورد سرد امکان تولید اعضا با ضخامتی از 1/5 تا 8 میلی متر را در دامنه وسیعی از مقاطع مورد نیاز اعضای اصلی فراهم می کند. اعضای اصلی به طول های مورد نظر بریده شده و برای پیچ شدن در نقاط تقاطع از قبل تعیین شده با خطایی در حدود $\pm 0/5$ میلی متر سوراخ می شوند.

برای پوشاندن دهانه های بلند، از سیستم هارلی تطبیق داده شده با شبکه های چند لایه استفاده می شود. همچنین می توان اندازه مقطع اعضای اصلی را افزایش داد و یک شبکه بزرگ تر به وجود می آورد.

3-2-5-2 سیستم مای اسکای¹

سیستم ثبت شده مای اسکای نتیجه گرایش به تولید روشی اقتصادی در ساخت شبکه های فضایی بود. هندسه شبکه فوقانی به صورت مربع یا مستطیل با یک شبکه جا به جا شده در لایه تحتانی است. اعضای اصلی در یک جهت ممتداند و صفحات بالدار زاویه دار با سوراخ های ایجاد شده در کارخانه در فاصله مناسب نسبت به هندسه شبکه به آنها جوش داده می شوند. در جهات قطری، اعضا منقطع هستند و صفحات بالدار به انتهای آنها جوش شده است. این صفحات به اعضای ممتد اصلی متصل می شوند. به طور کلی، مقطع همه اعضا از لوله های توخالی مربع یا دایره ای شکل تشکیل شده است. (شکل 3-21) یک گروه معمول از سیستم مای اسکای را نشان می دهد.

¹. Mai Sky



شکل 3-21: گره های معمول سیستم مای اسکای

نصب این سیستم در محل به وسیله پیچ کردن و اغلب در سطح زمین انجام می شود. اعضای ممتد لایه تحتانی به صورت اتوماتیک به دلیل اتصالات مقاطع اعضای منقطع در جهت های عمودی و افقی فاصله دار هستند. در همان زمان که اعضای اصلی به یکدیگر پیچ می شوند، اعضای قطری بین ورقه های زاویه دار ثابت می شوند. مراحل مشابهی هم برای نصب لایه فوقانی شبکه به کار می رود.

یک تیر ممتد کناری به طور طبیعی برای نگه داشتن شبکه ها در گره های لایه فوقانی به کار می رود. این مسئله برای محدود کردن تغییر شکل تکیه گاه های شبکه در فواصل مناسب در تکیه گاه های روی ستون ها نیز وجود دارد. پوشش بام و نصب تأسیسات اولیه را می توان قبل از اینکه شبکه توسط جرثقیل بالا کشیده شود، انجام شود.

3-5-3 مدول‌ها

تفاوت‌های زیادی در فرم واحدهای مدولار وجود دارد که موجب اختلاف در انواع پیش ساختگی می‌شود. هندسه‌ی هرمی با پایه مربع رایج‌ترین واحد مدولار است که برای ساخت خرپاهای فضایی به کار می‌رود، اگر چه سیستم‌های مدولار دیگری نیز ممکن است از قاب‌های فضایی با اتصالات صلب به وجود آید. در سیستم‌های مدولار همچنین ممکن است از نبشی، ناودانی، تیر عمودی یا مقطع ستون‌های عمومی برای اعضا استفاده شود، زیرا اغلب مقاطع توخالی ارزان قیمت‌ترند. در اتصال این مقاطع می‌توان از پیچ کردن ساده یا جوش دادن استفاده کرد.

برخی از سیستم‌های شبکه فضایی برای تولید مدول‌هایی با مقیاس بزرگتر است که بتوان آن‌ها را به سادگی در محل به یکدیگر پیچ کرد، از مزایای پیش ساختگی بهره می‌گیرند. این کار، زمان نصب در محل را کاهش می‌دهد.

بسته به شکل مدول، ممکن است افزایش در هزینه حمل ایجاد شود، برخی مدول‌ها مانند هرم‌های با پایه مربع یا نیمه هشت وجهی، می‌توانند به سادگی انبار شوند. در حالی که دیگر سیستم‌ها مانند مدول‌های قاب فضایی مکعبی شکل کیوبیک به فضای بیشتری نیاز دارند.

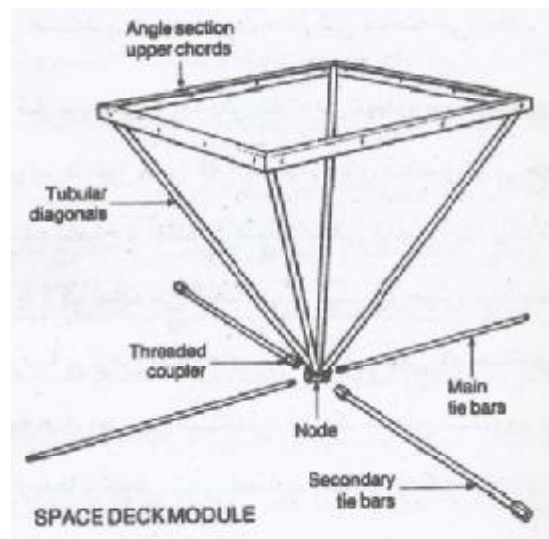
به طور معمول سیستم‌های یونی بات، اسپیس دک، ای بی بی ای دک اسپیس و مرو دی ای از مدول‌های هرمی استفاده می‌کنند که از مقاطع نبشی و ناودانی به یکدیگر جوش شده و یک قاب با پایه مربع شکل را برای هرم به وجود می‌آورند. سپس اعضای لوله‌ای جان به گوشه‌های قاب روی قطرهای و همچنین به یک رأس عنصر اتصالاتی جوش می‌شوند. از اعضای صاف یا لوله‌ای برای اتصال رئوس هرم و شکل دادن اعضای تحتانی یک شبکه سه بعدی استفاده می‌شود.

سیستم‌های دیگری از مدول‌های خرپای صاف با اشکال مختلف که بسته به نوع سیستم با روش‌های متفاوت نصب می‌شود نیز می‌توانند استفاده شوند. برای مثال، ممکن است برای شکل

دادن یک شبکه فضایی مربع دو طرفه، از مدول‌های پایه‌ای خرپای مستطیلی صاف که به وسیله گره‌های صفحه‌ای در شبکه فوقانی و تحتانی به یکدیگر متصل شده‌اند، استفاده کرد. سیستم قاب فضایی مکعبی شکل کیوبیک (CUBIC)، مدول‌هایی به شکل T یا L در پلان، برای اعضای فوقانی و تحتانی استفاده می‌کند.

3-5-3-1 اسپیس دک¹

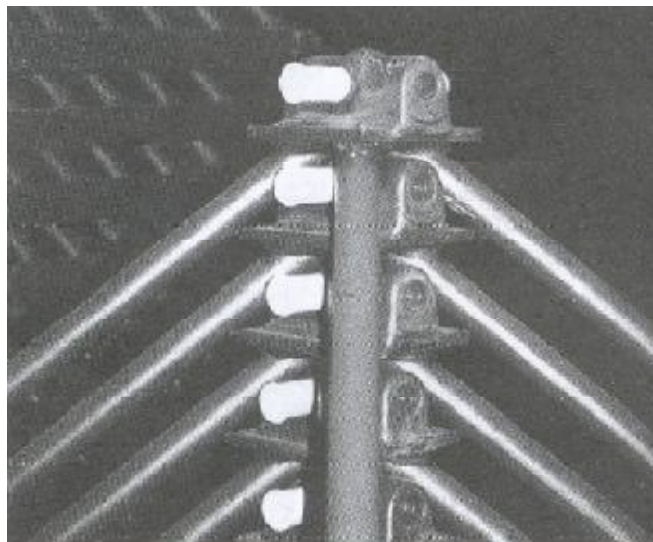
اسپیس دک (شکل 3-22) یک سیستم مدولار است که در اوایل دهه 1950 توسط دنینگز آف چارد در انگلستان معرفی شد. هزاران مثال از سازه اسپیس دک در نقاط جهان وجود دارد، چرا که این سیستم مدولار از پنجاه سال پیش تاکنون با همان فرم و فقط با تغییرات کوچکی در مصالح و ابعاد مدول‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستم براساس واحدهای هرمی از یک قاب مربعی و با استفاده از نبش‌های فولادی که توسط اعضای مهاري از لوله‌های فولادی مدور، به سمت یک رأس فولادی ریخته شده به



شکل 3-22: مدول‌های اسپیس دک

¹.space Deck

یکدیگر متصل شده‌اند. تمامی اعضای هرم‌ها برای اطمینان از درستی ابعاد آنها در شرایط کارخانه‌ای به یکدیگر جوش می‌شوند. رئوس ریخته شده هرم‌ها (شکل 3-23) یک سوراخ شیار دار روی هر وجه در یک جهت افقی و یک میله شیاردار پیش آمده از هر وجه در جهات عمودی دارد، یک میله از فولاد با مقاومت کششی بالا نیز برای اتصال رئوس اهرام مجاور به کار می‌رود. در یک جهت از شبکه تحتانی انتهای اعضا شیاری وجود دارد (یکی در سمت چپ و یکی در سمت راست) که به طور مستقیم به سوراخهای توپی در رئوس هرم‌ها پیچ می‌شود. قطعات زوج شش ضلعی توپی در انتهای میله‌های متصل کننده در جهات عمودی و افقی برای پیچ شدن روی میله‌های پیش آمده رئوس به کار می‌روند.



شکل 3-23: رئوس ریخته شده در نوک هرم‌های اسپیس دک
 ابعاد مدول‌های استاندارد که تولید می‌شوند عبارتند از: 1200×1200 میلی متر با ارتفاع 750 یا 1200 میلی متر، 1500×1500 میلی متر با ارتفاع 1200 و 1500 میلی متر و همچنین 2000×2000 میلی متر با ارتفاع 2000 میلی متر. مقاومت‌های متفاوت مدول‌ها براساس ابعاد کلی موجود است. تفاوت در مقاومت ناشی از ابعاد اعضای مهار است. مقاطع قوی‌تر اساساً برای تطابق با نیروهای برشی بزرگتری که در اطراف ستون‌های خرپای فضایی ظاهر می‌شود، به کار می‌روند.

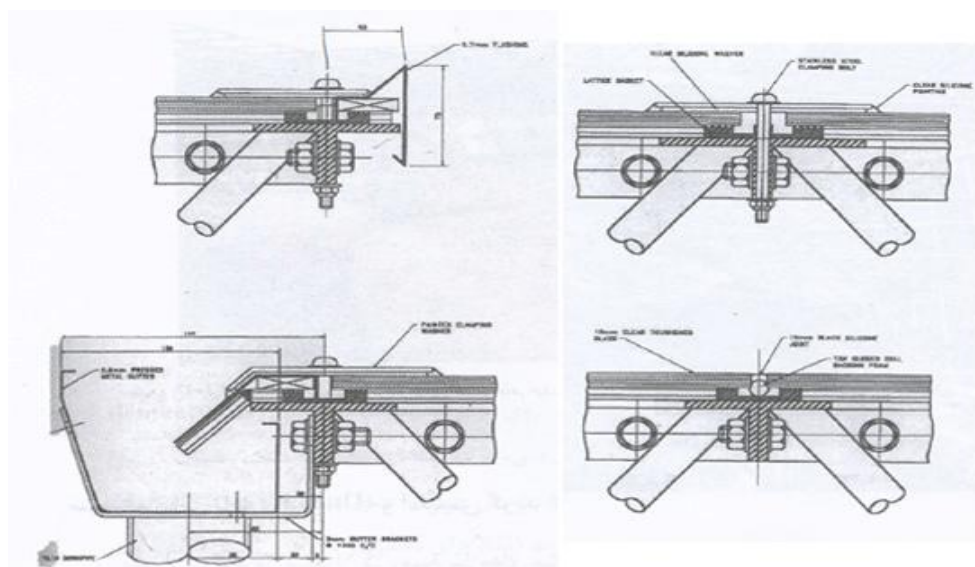
به دلیل ماهیت این سیستم، در نصب شبکه اسپیس دک نیمرخی با لبه قرنیزی تولید می‌شود. (زیرا مدول‌های استاندارد، هرم‌های معکوس هستند). به علاوه، در جایی که لازم است برای مدول‌های اصلی، نیم مدول‌های استاندارد برای ایجاد لبه‌های دو شیب، در دسترس است. مدول‌های هرمی مخصوص با ابعاد شبکه‌های مختلف هم در دسترس هستند و هم به صورت سفارشی ساخته می‌شوند.

طی ساخت مدول‌ها، نبشی‌های قاب فوقانی به طول‌های مورد نیاز بریده و به یکدیگر جفت می‌شوند و سوراخ‌هایی برای اتصال پیچ‌ها با توجه به چگونگی شکل قاب‌های ایجاد می‌شود. اعضای قطری نیز با طول‌هایی که در انتها زوایای مناسبی برای جوش‌های بعدی به قاب فوقانی و رئوس فولادی دارند بریده می‌شوند. رئوس ریخته شده سوراخ‌کاری و آماده می‌شوند. سپس تمامی اجزا پاک شده و نبشی‌ها و اعضای قطری لایه آستری می‌خورند و برای پوشش نهایی از رنگ یا لاک آماده می‌شوند. سپس نبشی‌ها جوش می‌شوند تا قاب‌های مربع شکلی را به وجود آورند که ممکن است برای مدول‌های استاندارد یا پاک کردن شبکه‌های پراکنده در جایی که تعدادی از واحدهای هرمی حذف شده‌اند (اغلب در یک الگوی شطرنجی) به کار روند. مدول‌های هرمی استاندارد از یک سطح مستوی، نبشی، رأس و چهار عضو قطری در یک ترکیب مثلثی برای بستن ابعاد و خطاهای زاویه‌ها و جوش دادن اعضا به یکدیگر تشکیل شده‌اند.

برای نصب سیستم اسپیس دک قاب فوقانی هرم‌ها از طریق نبشی‌ها به یکدیگر پیچ شده و سپس رئوس فولادی ریخته شده از طریق میله‌های اتصال به هم متصل می‌شوند. به علت ترکیب شیار پیچ‌های مقابل در هر کدام از انتهای اعضای اتصالی و انتقال چرخش پیچ‌های اعضا در هر انتها به رئوس (یا روی میله‌های عمودی) این امکان فراهم می‌شود تا فاصله بین مرکز گره‌های تحتانی به سهولت به هم نزدیک شده و خیز معکوس کوچکی در یک یا هر دو جهت ایجاد شود.

به این ترتیب ممکن است یک گنبد با خیز کم یا تاق گهواره ای ایجاد شود. شبکه نهایی، شکلی به صورت مربع روی مربع جابه‌جا شده دارد.

شبکه اسپیس دک می‌تواند در لایه فوقانی یا تحتانی در یک الگوی منظم یا اتفاقی نگه داشته شود. نسبت دهانه به ارتفاع معمول حدود 25 تا 30، برای بام‌هایی که در تمام لبه‌ها نگه داشته شده‌اند می‌باشد، هر چند این نسبت در صورتی که تکیه‌گاه‌ها فقط در گوشه‌ها باشند، باید کاهش یابد. پوشش‌ها ممکن است به طور مستقیم بر روی مدل‌های خرپای فضایی که تکیه‌گاه‌های مناسبی را در تمام لایه فوقانی شبکه به صورت مرکز به مرکز دارند، ثابت شوند. به طور معمول، بام اسپیس دک یک نبشی پیرامونی از اعضای بریده شده دارد، اما در موقعیتی که ابعاد پلان کلی ساختمان به طور مستقیم در ارتباط با ابعاد مدول‌های استاندارد نمی‌باشند، نودانی‌های محیطی به عرض بیش از 200 میلی‌متر یا سطوح محیطی به پهنای بیش از 375 میلی‌متر را می‌توان اضافه کرد. برخی از انواع لبه‌ها و جزئیات نصب شیشه در (شکل 3-24) نشان داده شده است. حمل و نقل خرپای فضایی اسپیس دک بسیار اقتصادی است، زیرا مدول‌های سبک وزن استاندارد به راحتی روی یکدیگر انبار و میله‌های مهاري به سادگی دسته می‌شوند.



شکل 3-24: لبه‌های معمول و جزئیات اتصال شیشه در سیستم اسپیس دک

3-5-2 سیستم یونی بات¹ و اسپیس گرید²

یکی از بزرگترین مبتکران در زمینه سازه‌های مشبک فضایی، معمار و مهندس استفان دوشاتیو بود. به دنبال توسعه و بهسازی یک سیستم، سیستم یونی بات در سال 1962 ایجاد شد. این سیستم ترکیبی از مدول‌های هرمی شکل با قاب‌های صلب است که لایه فوقانی را شکل می‌دهند، اما با این تفاوت که از پیچ‌های فولادی با مقاومت کششی بالا برای اتصال قاب‌های فوقانی مدول‌ها، فقط در گوشه‌ها استفاده می‌شود. این روش بسیار ساده‌تر و سریع‌تر از روش‌های مشابه است و مزایای اقتصادی در حیطه زمان و هزینه‌ی نصب دارد.

اسپیس گرید یک سیستم مدولار از خرپای فضایی است که توسط رونالد جی. تیلور³ برپایه‌ی سیستم یونی بات و با همکاری استفان دوشاتیو توسعه یافت. نام اسپیس گرید برای یک سیستم، شاید چندان مناسب نباشد، چرا که در آن هیچگونه مدول یا گره استاندارد وجود ندارد. این ملاحظات غیر ضروری محدودیت‌هایی برای طراحی مهندسان و معماران ایجاد می‌کنند. این توسعه بر اساس ایده‌ای است که شبکه‌های اقتصادی باید مطابق با ابعاد پلان و بارگذاری انتخاب شوند. به علاوه بیشتر مقاطع اقتصادی برای اعضا، مانند فولاد با نورد گرم یا سرد یا آلومینیوم، باید بر اساس نیروهایی که درون اعضا به وجود می‌آید، انتخاب شود. در نهایت، گره‌های اتصالی با خصوصیتی متناسب با شبکه، ابعاد و مقاطع اعضای انتخابی طراحی می‌شود.

رایج‌ترین شبکه‌هایی که از سیستم اسپیس گرید استفاده می‌کنند، مربع قطری روی مربع همانند سیستم یونی بات (unibat) است. مدول‌های هرمی اغلب فقط توسط یک پیچ در گوشه‌های شبکه فوقانی متصل می‌شوند. اعضای تحتانی ممکن است شامل میله‌های منفردی بین

¹. Unibat

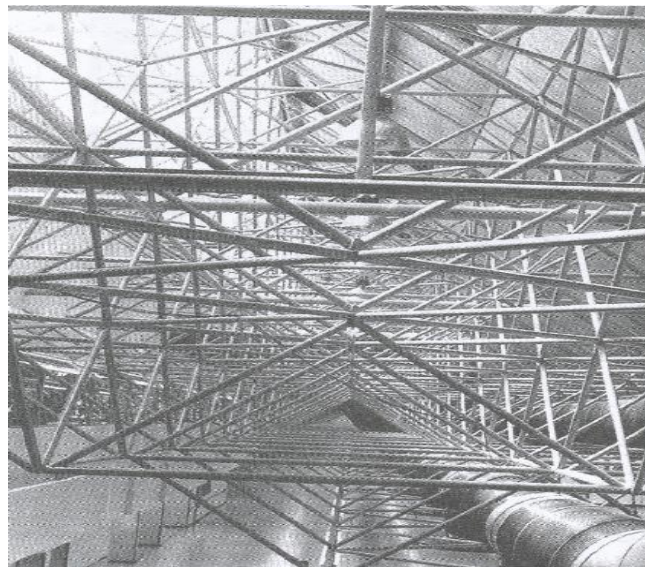
². Space Grid

³ - Ronald G. Taylor

گره‌های تحتانی و یا ترجیحا اعضای ممتد باشند. این امر نیاز به اتصال چندین عضو کششی در هر گره را کاهش می‌دهد. زیرا با اعضای ممتد، لازم نیست اتصالات برای کل نیروهای اعضا طراحی شوند (فقط برای بخشی از نیروهای اعضا که به سمت یا از سمت اعضای قطری در گره انتقال می‌یابد، طراحی می‌شوند).

3-3-5-3 سیستم ABBA

از سال 1983 سازه فضایی ABBA در چپرس‌تون در آفریقای جنوبی به صورت ساخت چندین سیستم ثانویه خرابای فضایی توسعه یافت. هزینه زیاد شبکه‌های سنتی متشکل از اتصال اعضای خطی که توسط گره‌های هم شکل ای.اچ. نوبل¹ به یکدیگر متصل می‌شوند، موجب شد تا تحقیقی برای گزینه‌های اقتصادی انجام شود.



شکل 3-25: سیستم مکعب فضایی ABBA

سیستم کیوبیک اسپیس² (Cubicspace) توسط ABBA در 1983 توسعه یافت و شامل

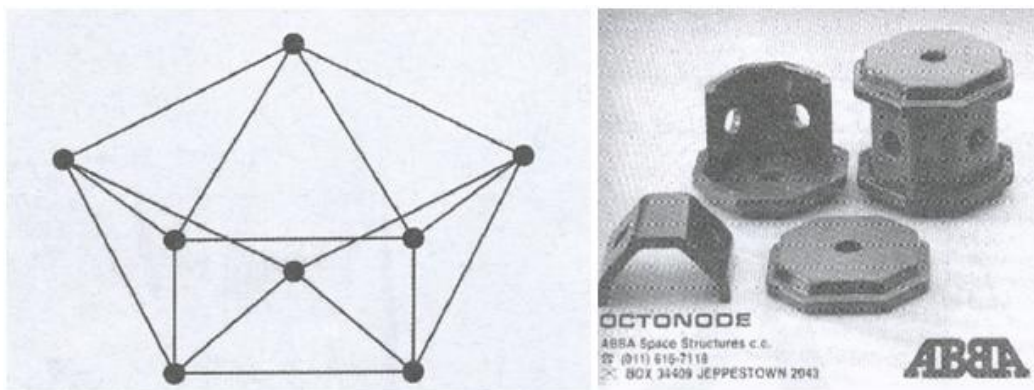
قاب‌های ثانویه مربع و مثلثی بود که برای شکل دادن مربع بر روی شبکه قطری نصب می‌شد در مرکز

¹ - A.H.Noble

² .Cubic Space

خرید های گیت¹ در ژوهانسبورگ آفریقای جنوبی در سال 1985 ، سیستم کیوبیک اسپیس برای ساخت یک شبکه فضایی چند لایه به کار رفت (شکل 3-25) و در سال 1986 سیستم مشابهی برای مرکز ژئوتکنیک در گلدفیلدز مورد استفاده قرار گرفت. واحدهای شبکه فضایی منفرد در سازه‌ی دوم با استفاده از گره‌های هشت‌تایی (شکل 3-26) که اساساً یک استوانه هشت وجهی با صفحات فوقانی و تحتانی بودند، به یکدیگر متصل شدند. با نصف کردن هشت وجهی می‌توان قطعات آن را از قبل بر روی زمین نصب کرد و آن را برای حمل با جرثقیل به محل مورد نظر به منظور اتصال به سازه آماده کرد.

سیستم دک اسپیس² که در سال 1987 معرفی شد، شامل واحدهای هرمی با قاب‌های فوقانی از نبشی و اعضای قطری لوله‌ای است که اولین بار برای یک تاق گهواره‌ای به قطر 32 متر در ساختمان تبلیغات مذهبی پاپ در ورینگینگ³ به کار برده شد.



شکل 3-26: سیستم مکعب فضایی ABBA با اتصال هشت وجهی

در سیستم اسپیس دک اولیه، هرم‌ها از طریق قاب‌هایی از نبشی به یکدیگر پیچ می‌شدند، اما در این مورد آن‌ها توسط اعضای لوله‌ای در شبکه تحتانی متصل شده بودند که متشکل از دو تاق گهواره‌ای مجزا بود که هر کدام با یک نیم گنبد خاتمه یافته و با یک واحد اداری جدا می‌شدند به طوری که مقطع نیم گنبد در لایه‌های متوالی از سطح زمین ساخته شده و بالا رفته است.

¹ - Highgate

² - Deckspace

³ - Vereeniging

فصل چہارم:

ہینڈ یا ای ہینڈس و سطح مقطع سازہ

بالکوریٹم رٹیک

4-1 مقدمه

یکی از هنرهای مهندسی بدست آوردن بیشترین بازده ، با انتخاب یک سیستم مناسب و صرف کمترین مصالح است. در مهندسی سازه، وظیفه سیستم های سازه تحمل بارهای مؤثر و معمولاً انتقال نیرو به تکیه گاه‌ها است. این سیستم ها ، علاوه بر آن که باید ایمن و کارآ باشند، در عین حال بایستی از کمترین هزینه و به نوعی از کمترین مصرف مصالح برخوردار باشند [13].

در راه نیل به امر بهینه سازی سازه های فضاکار همچون سایر سازه‌ها چهار دسته‌بندی عمده وجود دارد [2]:

- 1- بهینه یابی مقطع¹ که شامل انتخاب سطح مقطع بهینه اعضا است.
- 2- بهینه یابی شکل یا هندسه² که در آن مختصات بهینه گرهی به ازای نحوه قرارگیری مفروض اعضا تعیین می شود.

¹ . Sizing Optimization

² . Geometrical (Shape) Optimization

3- بهینه یابی توپولوژی^۱ که مشتمل بر تعیین بهترین آرایش اعضا در فضای مفروض مختصات گرهی است.

4- بهینه یابی پیکربندی که مشتمل بر سه مورد قبلی است.

در بهینه یابی مقطع ، طرح بهینه به ازای کمترین مقدار سطح مقطع با مختصات ثابت گرهی (هندسه ثابت) و همبندی ثابت سازه (توپولوژی ثابت) انجام می پذیرد (گلدبرگ و سمتانی 1986^۲ [36]). معمولاً در مسائل کاربردی مهندسی از مقاطع استاندارد موجود در بازار استفاده می شود. در این راستا بهینه یابی مقاطع منفصل^۳ ، با اتخاذ اعضا از لیست پروفیل های موجود ، توسعه و گسترش یافت. (راجیو و کریشنامورتی 1992 [16]). در این پایان نامه نیز در بهینه یابی مقاطع از مقاطع موجود در بازار استفاده شده است.

در بهینه یابی شکل یا هندسه ، مختصات گرهی سازه تحت یک توپولوژی (همبندی) مشخص جهت طراحی بهینه بررسی می شود. (ایمای و اشمیت 1981^۴ [37]) در اغلب مقالات الگوریتم ژنتیک ، بهینه یابی شکل بصورت توأم با سطح مقطع بهینه مورد بررسی قرار می گیرد. به عبارت دیگر در این گونه مسائل، هدف یافتن طرح بهینه سطح مقطع اعضا به همراه مختصات گرهی است.

در این پایان نامه، بهینه یابی هندسه و سطح مقطع سازه های فضاکار تخت دو لایه با کمک روش های نوین الگوریتم ژنتیک^۵ ، بررسی شده است. در این فصل ، در ابتدا به طور اجمالی به شرح مبانی بهینه یابی هندسه و سطح مقطع سازه های فضاکار توسط الگوریتم های ژنتیک پرداخته شده است.

¹ . Topological Optimization

² . Goldberg And Samtani, 1986

³ . Discrete Variable Optimization

⁴ . Imai And Schmit, 1981

⁵ . Advanced GA Methods

2-4 فرمولبندی مسأله بهینه یابی مقاطع و هندسه سازه های فضاکار براساس

GA

در این پایان نامه بهینه یابی مقاطع و هندسه سازه های فضاکار بر اساس GA، زمانیکه متغیرهای طراحی منفصل بوده و می بایست از لیست مقاطع موجود¹ انتخاب شوند، مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. فرمولبندی مسأله بشرح زیر تعریف می شود:

یافتن سطح مقطع و مختصات گرهی (طول) مناسب برای هر عضو:

$$A = [a_1, a_2, \mathbf{K}, a_{Nos}]^T \quad ; \quad a_i \in S \quad ; \quad i = 1, \mathbf{K}, Nos \quad (1-4)$$

$$J_i^{\min} \leq J_i(X_i, Y_i, Z_i) \leq J_i^{\max} \quad i = 1, \dots, NOJ \quad (2-4)$$

جهت کمینه سازی تابع هدف $f(A)$ که در معرض قیود زیر می باشد:

$${}^2 G1 = \begin{cases} g_{i1}(A) = 0 & \text{if } \frac{S_{iT}}{S_{all(Ten)}} - 1 \leq 0 \quad ; \quad i = 1, \mathbf{K}, Net \\ g_{i1}(A) = \frac{S_{iT}}{S_{all(Ten)}} - 1 & \text{if } \frac{S_{iT}}{S_{all(Ten)}} - 1 > 0 \quad ; \quad i = 1, \mathbf{K}, Net \end{cases} \quad (3-4)$$

$${}^3 G2 = \begin{cases} g_{i2}(A) = 0 & \text{if } \frac{S_{iC}}{S_{all(Com)}} - 1 \leq 0 \quad ; \quad i = 1, \mathbf{K}, Nec \\ g_{i2}(A) = \frac{S_{iC}}{S_{all(Com)}} - 1 & \text{if } \frac{S_{iC}}{S_{all(Com)}} - 1 > 0 \quad ; \quad i = 1, \mathbf{K}, Nec \end{cases} \quad (4 - 4)$$

¹ . Available Section List

² . Constraint Tensile Stress

³ . Constraint Compressive Stress

$$G3 = \begin{cases} g_{i3} = 0 & \text{if } \frac{\lambda_i}{\lambda_{ten}} - 1 \leq 0 ; i = 1, \dots, Net \\ g_{i3} = \frac{\lambda_i}{\lambda_{ten}} - 1 & \text{if } \frac{\lambda_i}{\lambda_{ten}} - 1 \geq 0 ; i = 1, \dots, Net \end{cases} \quad (5 -$$

4)

$$G4 = \begin{cases} g_i \\ g_{i4} = \end{cases}$$

$$G5 = \begin{cases} g_{i5}(A) = 0 & \text{if } \left| \frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}} \right| - 1 \leq 0 ; i = 1, \mathbf{K}, N dof \\ g_{i5}(A) = \frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}} - 1 & \text{if } \left| \frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}} \right| - 1 > 0 ; i = 1, \mathbf{K}, N dof \end{cases} \quad (V - 4)$$

هر یک از موارد فوق بشرح زیر قابل تفسیر است.

1-2-4 متغیرهای طراحی

رابطه (1-4) بردارمتغیرهای سطح مقطع را نشان می دهد. در این رابطه

\mathbf{A} : حاوی متغیرهای طراحی سطح مقطع می باشد.

S : مجموعه پروفیل های موجود است ، که بر اساس آن طراحی تشکیل می گردد.

Nos : تعداد اعضای مجموعه S است. به عبارت دیگر تعداد مقاطع موجود که برای

طراحی استفاده می شود.

a_i : سطح مقطع هر عضو از سازه است ، که می تواند هر مقدار از مجموعه S را

اختیار نماید.

رابطه (2-4) بردارمتغیرهای هندسی را نشان می دهد. در این رابطه

$\mathbf{J}_i(X_i, Y_i, Z_i)$: حاوی مختصات گرهی می باشد.

\mathbf{J}_i^{\max} و \mathbf{J}_i^{\min} : به ترتیب حدود بالا و پایین مختصات گرهی، گره مورد نظر است.

NOJ : تعداد گره های سازه فضاکار

در روند بهینه یابی با الگوریتم ژنتیک ، سازه‌های مختلف با هندسه‌ی گوناگون ، توسط اپراتورهای ژنتیک ساخته می شود که ممکن است برخی از این سازه‌ها ، از نقطه نظر اجرایی قابلیت ساخت را نداشته باشند. برای مثال مختصات بدست آمده برای دو نقطه گرهی مجاور هم یکسان شود. این امر به این معنا است که دو گوی مفصل بر روی هم قرار گرفته و المان بین این دو حذف می شود که این با فرض اولیه در تناقض است که تحت یک توپولوژی خاص بهینه یابی هندسی صورت پذیرد. برای رفع این مشکل از یک عدد که توسط کاربر تعریف می شود، استفاده شده است. به این ترتیب مختصاتی که گره i ام می تواند بپذیرد با توجه به این عدد محدود می شود و به شرطی که این عدد غیر از صفر لحاظ شود هیچ گاه دو نقطه گرهی مجاور بر روی هم قرار نمی گیرند. در فصل آتی نحوه‌ی رمزگشایی آن در بخش مربوطه ذکر می گردد.

2-2-4 تابع هدف

از آنجایی که هدف کمینه نمودن وزن سازه به ازای بهترین مختصات گرهی است ؛ بنابراین می توان تابع هدف را بشرح زیر تعریف نمود:

$$f(A) = \sum_{i=1}^{Ne} (r_i \mathbf{1}_i(J) a_i) \quad (8-4)$$

که در آن

\mathbf{V} Ne : تعداد اعضای سازه است.

\mathbf{V} r_i : وزن مخصوص مصالح¹ هر عضو از سازه است که در اغلب اوقات برای تمامی اعضا یکسان فرض می شود.

\mathbf{V} $\mathbf{1}_i(J)$: طول هر عضو از سازه که تابعی از مختصات گرهی است.

\mathbf{V} a_i : سطح مقطع هر عضو از سازه است.

حال اگر هدف کمینه نمودن حجم سازه به ازای بهترین هندسه سازه موردنظر باشد ؛ آنگاه

تابع هدف بشرح زیر تعریف می شود:

¹ . Density

$$f(A) = \sum_{i=1}^{Ne} (\mathbf{1}_i(J) a_i) \quad (9-4)$$

که در آن تعاریف $\mathbf{1}_i(J)$ ، a_i و Ne مشابه رابطه (8-4) تعریف می شود.

3-2-4 قید $G1, G2$

برای هر سازه ای، همواره می بایست تنش ناشی از بارگذاری در تمامی اعضا، در محدوده مجاز و قابل قبول آئین نامه‌ها قرار داشته باشد. این مقدار مجاز براساس جنس مصالح اعضای به کار رفته در سازه تعیین می‌شود. بنابراین در روند بهینه یابی مقاطع و هندسه از طریق الگوریتم ژنتیک ، پس از تحلیل سازه ، تنش تک تک اعضای محاسبه می شود. در صورت نقض قیود بر اساس روابط (3-4) و (4-4) جریمه ای به کروموزوم مربوطه اعمال می شود. باید توجه داشت که رابطه (3-4) مقدار نقض قیود ناشی از تنش کششی اعضای سازه فضاکار و رابطه (4-4) مقدار نقض قیود ناشی از مقدار تنش فشاری اعضای سازه را محاسبه می نماید. به عبارت دیگر براساس اینکه عضو فشاری یا کششی است ، نقض قیود آن توسط رابطه مربوطه کنترل و در صورت لزوم ، مقدار آن محاسبه می شود. پارامترهای روابط (3-4) و (4-4) به شرح ذیل تعریف می شود:

✓ $g_{i1}(A)$: میزان جریمه نقض قید تنش کششی اعضای سازه فضاکار

✓ s_{iT} : تنش کششی عضو i ام

✓ $s_{all(Ten)}$: تنش مجاز و قابل قبول کششی

✓ Net : تعداد اعضای کششی سازه به ازای توپولوژی موجود

✓ $g_{i2}(A)$: میزان جریمه نقض قید تنش فشاری اعضای سازه فضاکار

✓ s_{iC} : تنش فشاری عضو i ام

✓ $s_{all(Com)}$: تنش مجاز و قابل قبول فشاری

✓ Nec : تعداد اعضای فشاری سازه به ازای توپولوژی موجود

تنش کششی مجاز، بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران عبارت است از: [38]

$$\sigma_{all(Ten)} = 0.6 F_y \quad (10-4)$$

که در آن

F_y : تنش جاری شدن مصالح می باشد.

تنش فشاری مجاز مطابق با آئین نامه فولاد ایران از روابط زیر به دست می آید. [38]

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (11-4)$$

C_c : لاغری مرزی

E : مدول الاستیسیته^۱ مصالح مصرفی می باشد.

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda < \text{الف} \\ F_s = 1.67 + \\ \sigma_{all(com)} = \\ \lambda < \text{ب} \\ \sigma_{all(com)} = \end{array} \right.$$

λ : لاغری عضو

F_s : ضریب اطمینان

^۱ . Elasticity Modulus

4-2-4 قید G3 و G4

علاوه بر قید تنش، محدودیت لاغری قید بعدی است که باید در نظر گرفته شود. مطابق با آئین نامه فولاد ایران برای اعضای کششی این مقدار برابر 300 می باشد و برای اعضای تحت فشار لاغری حداکثر نباید از 200 تجاوز کند. [38]

در این روابط:

✓ g_{i3} : مقدار جریمه نقض قید لاغری اعضای کششی

✓ G_{i4} : مقدار جریمه نقض قید لاغری اعضای فشاری

✓ λ_i : لاغری عضو i ام

$$\lambda_{ten}=300$$

✓ λ_{ten} : لاغری مجاز اعضای کششی

$$\lambda_{com}=200$$

✓ λ_{com} : لاغری مجاز اعضای فشاری

5-2-5 قید G5

همان طور که بیان شد ، هدف از این پایان نامه بهینه‌یابی مقاطع و هندسه سازه‌های فضاکار با فرض توپولوژی ثابت است. در این راستا همواره کنترل مقدار تغییر مکان گره های سازه ، امری حیاتی و ضروری است.

برای این منظور رابطه (4-7) مقدار تغییر مکان قائم کلیه گره های سازه را کنترل می نماید. به عبارت دیگر پس از تحلیل سازه و محاسبه مقادیر تنش ، میزان تغییر مکان گره های سازه محاسبه می‌شود. در صورتی که تغییر مکان درجه آزادی i ام ، در محدوده مجاز باشد ، جریمه ای به رشته

موردنظر تعلق نمی‌گیرد. اما در غیراین صورت ، کروموزوم مربوطه متناسب با میزان تخطی جریمه

خواهد شد. مقدار این جریمه ، بر اساس روابط (6-4) بدست می‌آید. در این روابط

▼ $g_{i4}(A)$: مقدار جریمه نقض قید تغییر مکان گره های فعال سازه

▼ Δ_i : مقدار تغییرمکان درجه آزادی i ام

▼ NoJ : تعداد گره های سازه¹

▼ Δ_i^{all} : مقدار تغییرمکان مجاز و قابل قبول درجه آزادی i ام که بر اساس آئین‌نامه فولاد

ایران برای بار زنده عبارت است از

$$\Delta_i^{all} = \frac{L}{360} \quad (12 - 4)$$

باید توجه داشت که قیود G1 تا G5 در روابط (3-4) ، (4-4) ، (5-4) ، (6-4) و (7-4)

بصورت قیود نرمال شده² بیان شده اند. این کار نتایج خوبی را به دنبال خواهد داشت زیرا به

کمّی ، میزان نقض تنش بسیار متفاوت با نقض تغییرمکان است و نرمال کردن قیود سبب

می‌شود ارزش کمّی یکسانی به آن‌ها اختصاص یابد. [13]

¹ . Number Of Joint

² . Normalized Constraints

فصل پنجم:

راهنمای برنامه

5-1 مقدمه

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو است که با کمک نقاط مختلف ، فضای طراحی را کاوش می نماید. بنابراین نیاز به تعداد دفعات تکرار بسیار زیاد جهت رسیدن به جواب بهینه ، سبب افزایش حجم محاسبات عددی در فرآیند بهینه یابی می شود.

از سوی دیگر عدم شناخت درست از پارامترها و روابط حاکم بر الگوریتم ژنتیک از قبیل تعداد اعضای جمعیت ، تعداد نسل ها¹ ، نرخ عملگرهای الگوریتم ژنتیک همچون پیوند و جهش ، نوع تابع جریمه و مقادیر ثابت دخیل در آن ، نوع تابع شایستگی و چگونگی فرآیند انتخاب سبب می شود تا در برخی مواقع الگوریتم ژنتیک ، بهینه نسبی را بدست آورد [13].

امروزه با پیشرفت رایانه‌ها در زمینه نرم‌افزار و سخت‌افزار ، مشکل سرعت عملیات بهینه‌یابی از طریق الگوریتم ژنتیک ، تا حدودی حل شده است ؛ اما تنظیم پارامترها و شناسایی صحیح روابط

¹ . No Of Generation

حاکم بر الگوریتم ژنتیک، از جمله مشکلات دنیای امروزی الگوریتم‌های ژنتیک می‌باشد. افراد مختلفی با بیان روش‌های گوناگون سعی در حل این مشکل نموده‌اند.

در این پایان‌نامه از روش پیشنهادی در مرجع [13] جهت بهینه‌یابی مقاطع و هندسه سازه‌های فضاکار استفاده شده است. ویژگی منحصر بفرد این الگوریتم در کاهش تأثیر پارامترهای GA و افزایش سرعت عملیات بهینه‌یابی می‌باشد. این الگوریتم که روش جستجوی چند منظوره (M.S.M)¹ نام‌گذاری شده است روشی نیرومند جهت بهینه‌یابی سازه‌های خرابایی می‌باشد. این ادعا با مقایسه نتایج مثال‌های متداول در دنیای الگوریتم ژنتیک در مرجع [13] شرح داده شده است.

در روش جستجوی چند منظوره (M.S.M)، جمعیت به بخش‌های مختلف (جزایر متنوع) تقسیم می‌شود. هر بخش² دارای محیطی³ متفاوت و ساختاری منحصر بفرد است. ویژگی‌ها و ساختار هر بخش بر اساس آزمودن عملگرهای مختلف GA و انتخاب بهترین، شکل گرفته است. به عبارت دیگر برای تشکیل جزایر⁴، کلیه شیوه‌ها و عملگرهای مشروح در فصل سوم به کمک زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک⁵ کد شده و بر اساس نتایج بهترین‌ها انتخاب و به کار گرفته شده است. این طریقه عمل سبب می‌شود که جواب‌ها تنوع خوبی داشته باشند. در پایان تعداد نسل سازی‌های معین براساس وقفه مهاجرت و طبق نرخ مهاجرت بهترین‌ها در مجموعه جزایر جابه‌جا می‌شوند تا در نهایت، الگوریتم به جواب‌های مناسبی برسد.

در مسایلی که به دلیل زیاد بودن تعداد متغیرهای طراحی و بزرگ بودن فضای کاوش، تأثیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک نقشی اساسی ایفا می‌نمایند و استفاده از روش‌های متداول منتهی به

¹ . **M**ulti **S**earch **M**ethod

² . Part

³ . Environment

⁴ . Islands

⁵ . Visual Basic

جواب بهینه نمی‌شود ، مدل پیشنهادی به طور مؤثر و هوشمندی فضای طراحی را مورد کاوش و در نهایت بهترین جواب‌های ممکن را ارائه می‌دهد.

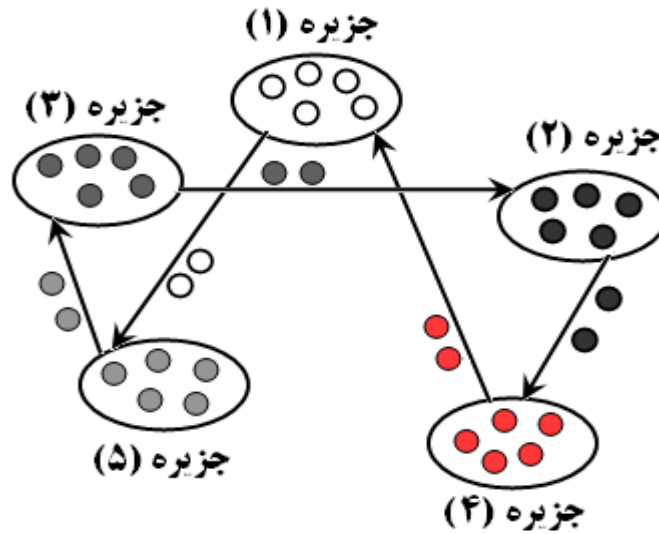
برای مسائلی که متغیرهای طراحی بسیار زیاد و فضای کاوش بزرگ می‌باشد اگر تعداد قیده‌های طراحی نیز زیاد باشد روند دستیابی به سازه بهینه بسیار کند می‌شود و جزء مسائل زمان‌بر به شمار می‌آید. در این پایان‌نامه روشی پیشنهاد شده است که میزان نقض قیود سازه را کم می‌کند و بدین منظور قسمتی از کروموزوم‌هایی که باعث نقض قید می‌شوند را شناسایی و اصلاح می‌کند. این روش اصلاح ژنتیکی کروموزوم‌ها نام‌گذاری می‌شود.

در ادامه روش جستجوی چند منظوره (M.S.M) به طور اجمالی بیان شده است. و سپس شرح روش اصلاح ژنتیکی کروموزوم ارائه می‌گردد.

2-5 روش جستجوی چند منظوره (M.S.M)

در این روش یک جمعیت بزرگ به تعدادی زیر جمعیت¹ کوچکتر تقسیم می‌شود و الگوریتم ژنتیک مرسوم با عملگرها و پارامترهای متفاوت، برای هر کدام از زیر جمعیت‌ها به طور جداگانه به کار گرفته می‌شود. هر کدام از این جمعیت‌ها به عنوان یک جزیره نامیده می‌شود. تعدادی از بهترین کروموزوم‌های هر جزیره پس از طی چند نسل مشخص ، بطور تصادفی به جزایر دیگر منتقل می‌شود. این مطلب در شکل (1-5) نشان داده شده است.

¹ . Subpopulations



شکل (1-5) - روش جستجوی چند منظوره

در فرآیند انتقال دو پارامتر بشرح زیر تعریف می شود:

1. وقفه مهاجرت¹: بیانگر تعداد نسل ها بین هر انتقال می باشد.
 2. نرخ مهاجرت²: بیانگر درصد اعضای منتخب برای انتقال از هر جزیره در زمان انتقال می باشد.
- نحوه مهاجرت انتخاب شده به صورت یک حلقه با مقصدهای تصادفی³ می باشد که هر کدام از زیرجمعیتها دارای یک مقصد تصادفی می باشند و این مقصدها به طور تصادفی در هر دوره تناوب مهاجرت⁴ مشخص می شوند.

¹ . Migration Interval

² . Migration Rate

³ . Random Destinations

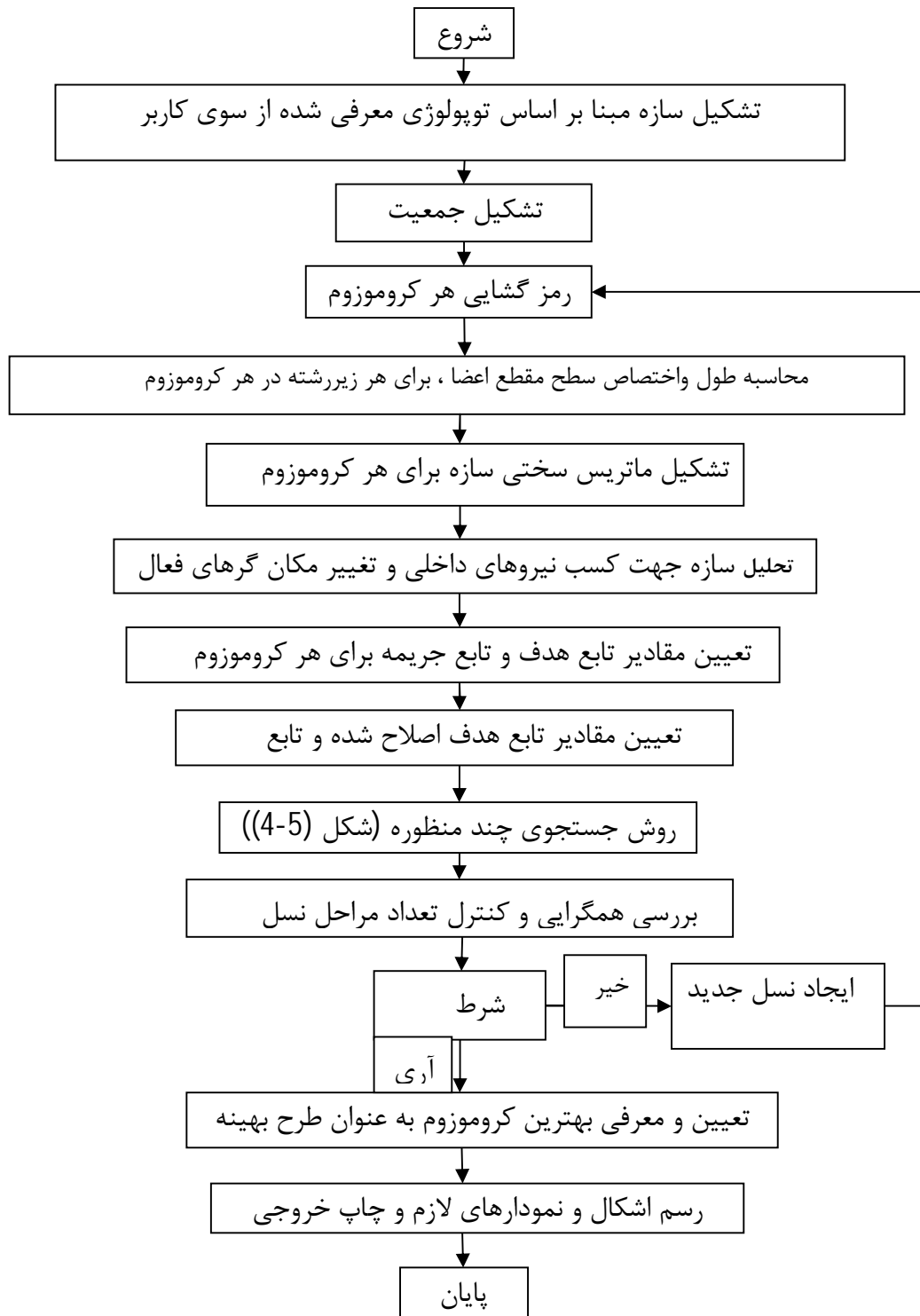
⁴ . Migration Period

در روش جستجوی چند منظوره به دلیل خصوصیات مجزای فضای هر جزیره ، می توان از تمامی روش های معتبر و کارآمد معرفی شده توسط محققین بهره جست. به عبارت دیگر هر مسئله بهینه یابی در یک لحظه با چندین روش بررسی و فضای طراحی کاوش می شود و در ادامه بهترین نتایج ، فی مابین دیگر جزایر به اشتراک گذاشته و جمعیت های جدیدی در اختیار هر جزیره جهت پرورش قرار می گیرد. این خصوصیات بطور دسته جمعی سبب کاهش تأثیر پارامترها و روابط حاکم بر عملیات GA می شود و سرعت همگرایی الگوریتم را بطور شگرفی افزایش می دهد.

لازم به ذکر است که در الگوریتم فوق فرآیندهای انتخاب در هر جزیره متفاوت با جزیره های دیگر می باشد. برای این منظور کلیه فرآیندهای انتخاب مشروح در فصل سوم بررسی و بهترین ها در هر جزیره قرار گرفته اند. در انتخاب فرآیند ادغام ، نیز کلیه عملگرهای GA با زبان برنامه نویسی ویژوال بیسک [39-40] بررسی و کارآمد ترین آن ها بر اساس نتایج در جزایر به کار گرفته شده اند.

5-3 کلیات الگوریتم بهینه یابی مقاطع و هندسه سازه ها

برای این منظور فلوچارت الگوریتم در شکل (5-2) نشان داده شده است. کلیه مراحل فلوچارت ، در ادامه به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.



شکل (2-5) – فلوجارت M.S.A برای بهینه یابی مقاطع و هندسه سازه ها



شکل (3-5) - فلوچارت روش جستجوی چند منظوره (M.S.M)

5-3-1 الگوریتم تولید جمعیت اولیه

در این پایان نامه برای نمایش متغیرهای طراحی سطح مقطع و هندسه ، از شیوه کدگذاری دودویی استفاده شده است. بنابراین در زیربرنامه تولید جمعیت اولیه ، با تولید تصادفی زیر رشته‌ها به تعداد متغیرهای طراحی سطح مقطع به این مقصود دست می یابیم. شیوهی دیگری که در تولید زیر رشته سطح مقطع به کار گرفته می شود تولید متغیر سطح مقطع به صورت عدد تصادفی در محدوده صفر تا Nos و تبدیل آن به یک عدد دودویی (رمز کردن¹) است.[8]. در بهینه یابی سطح مقطع سازه ها، متغیرهای طراحی سطح مقطع عرضی ، اعضای گروه بندی شده می باشند که بایستی از لیست پروفیل های موجود یعنی از مجموعه $S = \{A_1, A_2, \mathbf{K}, A_{Nos}\}$ انتخاب گردند.

برای متغیرهای هندسی مختصات گرهی اعضا به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شده است، بدین منظور برای هر گره سه مختصات Z, Y, X به عنوان متغیرهای هندسی در نظر گرفته شده اند. این متغیرها نیز مانند متغیرهای سطح مقطع به صورت تصادفی ساخته می شوند.

در این پایان نامه ابتدا تمامی زیر رشته های مربوط به سطح مقطع و سپس تمام زیر رشته های مربوط به مختصات X, Y و Z گره ها به دنبال هم قرار می گیرند.

5-3-2 رمز گشایی² هر کروموزوم

همان طور که قبلاً بیان شد؛ از جمله ویژگی های یک شیوه کدگذاری مناسب ، قابلیت تبدیل یک به یک بین عناصر گذشته و کننشته است. به عبارت دیگر می بایست ، هر نقطه در فضای جستجو قابل تبدیل به یک رشته باشد. در شیوه نمایش دودویی این ویژگی ، بارز و مبرهن است. در

¹ . Encoding

² . Decoding

این پایان نامه با استعانت از روابط زیر ، تبدیل متغیرهای طراحی سطح مقطع به رشته های دودویی به راحتی قابل دستیابی است.

هر بیت قابلیت نمایش دو مقدار صفر و یک را دارد. بنابراین در ابتدا طول یک زیررشته بر اساس تعداد اعضای لیست مقاطع بشرح زیر تعیین می گردد:

$$2^{BinArea} \geq Nos \quad (1-5)$$

در رابطه فوق مجهول BinArea تعداد بیت ها یا کاراکترهای یک زیررشته می باشد و Nos تعداد اعضای موجود در لیست مقاطع است که مقداری معلوم می باشد.

کوچکترین مقدار BinArea که به ازای آن رابطه (1-5) برقرار باشد ، به عنوان طول یک زیررشته منظور می شود. به عبارت دیگر اولین عددی که به ازای آن نامساوی رابطه (1-5) برقرار می شود ، طول هر زیررشته است.

اما نکته حائز اهمیت ، آن است که هر زیررشته سطح مقطع ، می بایست بیانگر شماره مقطع ای از لیست پروفیل های موجود باشد. به عبارت دیگر ، هر یک از اعضای لیست مقاطع باید هم ارز با یک زیررشته باشد.

با توجه به اینکه یک زیررشته BinArea بیتی اعداد 0 تا $2^{BinArea} - 1$ را کد می کند ، مقدار متناظر زیررشته سطح مقطع i ام بشرح زیر قابل محاسبه است:

$$NArea_i = \sum_{j=1}^{BinArea} 2^j b_j \quad (3-5)$$

که هر بیت b می تواند اعداد صفر یا یک را اختیار کند و به صورت رشته زیر نمایش داده می شود:

$$b_{BinArea} \mathbf{K} b_3 b_2 b_1 \quad (4-5)$$

در روابط (3-5) $NArea_i$ ، عدد صحیح متناظر با زیررشته i ام می باشد که در محدوده صفر تا $2^{BinArea} - 1$ قرار دارد.

حال برای آنکه $NArea_i$ به شماره مقطع قرار گرفته در لیست پروفیل های S یعنی $Nsection_i$ ارتباط داده شود ، از رابطه کلی زیر استفاده می شود:

$$Nsection_i = Int\left(NArea_i * \frac{Nos}{(2^{BinArea} - 1)} \right)$$

$$1 \leq Nsection_i \leq Nos \quad ; \quad 0 \leq NArea_i \leq 2^{BinArea} - 1 \quad (5-5)$$

در رابطه (5-5) تابع $Int()$ ، قسمت اعشاری عدد درون پرانتز را حذف و عدد صحیح باقیمانده را ارائه می دهد.

براساس رابطه (5-5) رشته هایی که با هیچکدام از متغیرهای طراحی هم ارز نمی باشند ، ترمیم شده و متناظر با یکی از اعضای مجموعه S قرار می گیرند. البته باید توجه داشت که اینکار ممکن است سبب شود برخی از مقاطع لیست پروفیل های موجود ، با احتمال بیشتری برای متغیر طراحی سطح مقطع انتخاب شوند.

طول زیر رشته مورد نظر برای متغیرهای هندسی نیز مانند رابطه (5-1) می باشد. با این تفاوت که سمت راست نامساوی را باید تعیین کنیم . یعنی متغیرهای هندسی در چه بازه ای قرار می گیرند که در روابط زیر این امر را نشان داده شده است.

$$2^{BinX} \geq \frac{Lx}{Dm} \quad (6-5)$$

$$2^{BinY} \geq \frac{Ly}{Dn} \quad (7-5)$$

$$2^{BinZ} \geq Z_{max} - Z_{min} \quad (8-5)$$

که در روابط فوق:

BinX: تعداد بیت‌های مورد نیاز برای بیان متغیر X هر یک از گره‌های سازه ✓

BinY: تعداد بیت‌های مورد نیاز برای بیان متغیر Y هر یک از گره‌های سازه ✓

BinZ: تعداد بیت‌های مورد نیاز برای بیان متغیر Z هر یک از گره‌های سازه ✓

L_x و L_y : به ترتیب طول سازه در جهت X و Y ✓

D_n و D_m : به ترتیب تعداد چشمه‌های سازه در جهت X و Y می‌باشد. ✓

Z_{min} و Z_{max} : به ترتیب حداکثر و حداقل ارتفاع سازه فضاکار می‌باشد که از کاربر گرفته ✓

می‌شود.

برای رمزگشایی متغیرهای هندسی داریم:

$$X_i = X^L + \text{int} \left[\frac{L_x}{2^{BinX} - 1} * \sum_{k=1}^{k=BinX} 2^k * b_K \right] \quad (9-5)$$

X^L : کوچکترین مقدار X برای گره i ام می‌باشد. ✓

با کدگشایی از طریق معادله فوق ممکن است دو گره مجاور به هم برخورد کنند یا اینکه فاصله آنها آن قدر به هم نزدیک باشد که نتوان عضوی را از نظر اجرایی بینشان قرار داد لذا معادله فوق به صورت ذیل اصلاح شده است.

$$X_i = X^L + \frac{Length_{min}}{2} + \text{int} \left[\frac{L_x - Length_{min}}{2^{BinX} - 1} * \sum_{k=1}^{k=BinX} 2^k * b_K \right] \quad (10-5)$$

$Length_{min}$: کوتاهترین طول عضو ممکن از لحاظ اجرایی ✓

بدین ترتیب برای متغیر y خواهیم داشت:

$$Y_i = Y^L + \frac{Length_{min}}{2} + int \left[\frac{L_y - Length_{min}}{2^{BinY-1}} * \sum_{k=1}^{k=BinY} 2^k * b_K \right] \quad (11-5)$$

اما برای متغیر Z ارتفاع تمامی گره های لایه پایین برابر صفر و تمام گره های لایه بالا برابر یک عدد (Z) فرض شده است .

$$Z = Z_{min} + int \left[\frac{Z_{max} - Z_{min}}{2^{BinZ-1}} * \sum_{k=1}^{k=BinZ} 2^k * b_K \right] \quad (12-5)$$

3-3-5 ماتریس سختی هر کروموزوم

در روند بهینه‌یابی با الگوریتم ژنتیک ، سازه‌های مختلفی (از نظر هندسی) در جزایر ساخته می‌شوند . طول اعضا متناسب با موقعیت گره های ابتدایی و انتهایی توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$I = \sqrt{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2)} \quad (13-5)$$

از سوی دیگر در این مرحله ، سطح مقطع کلیه اعضای توپولوژی حاضر متناسب با زیررشته مربوطه و بنابر اطلاعات مرحله قبل (رمز گشایی زیررشته ها) مشخص می‌گردد. لازم به ذکر است که محاسبه طول و سطح مقطع اعضای کروموزوم ها در هر مرحله از الگوریتم ، بطور مستقل از مراحل پیشین انجام می‌گیرد.

سپس یک زیر برنامه شروع به شماره گذاری گره‌ها می نماید تا مشخص شود که یک المان بین کدام گره‌ها واقع است. در نهایت کلیه پارامترهای لازم جهت تشکیل ماتریس سختی سازه¹ یعنی پارامترهای $\frac{EA}{L}$ در این مرحله از الگوریتم محاسبه می شوند.

5-3-4 تحلیل سازه مربوط به هر کروموزوم

در این تحقیق ، جهت کسب نیروهای داخلی و محاسبه تغییرمکان گره‌های فعال سازه از عملیات تحلیل ماتریسی استفاده شده است. برای این منظور با تشکیل ماتریس سختی برای هر کروموزوم به آنالیز سازه پرداخته می‌شود. در طی این روند ، حل یک دستگاه n معادله با n مجهول نیاز است. برای نیل به این هدف از شیوه حل دستگاه به روش چولسکی² استفاده شده است. استفاده از این شیوه سبب افزایش سرعت عملیات بهینه یابی از طریق الگوریتم مطروحه می‌شود. ویژگی‌های روش حل دستگاه به شیوه چولسکی در پیوست به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است.

با حل دستگاه معادلات ، مقادیر تغییرمکان گره‌های سازه بدست می‌آید. در ادامه پس از محاسبه تغییرمکان گرهی نوبت به محاسبه مقادیر نیروهای داخلی اعضا می‌رسد تا با استفاده از آن‌ها و سطح مقطع هر عضو ، مقدار تنش در اعضای سازه محاسبه شود.

در نهایت امر پس از محاسبه مقادیر تنش‌ها و تغییر مکان گره‌های فعال سازه نوبت به مرحله بعدی الگوریتم ، یعنی محاسبه تابع جریمه و تابع هدف می رسد.

¹ . Structure Stiffness Matrix

² . Cholesky Method

5-3-5 تابع هدف و تابع جریمه مورد استفاده

پس از تحلیل کروموزوم ها به جهت کسب نیروهای داخلی و تغییر مکان‌های گرهی ، نوبت به محاسبه میزان جریمه هر کروموزوم متناسب با نوع و میزان تخطی آن می‌رسد. همان‌طور که در فصول پیشین اشاره شد ، برای بررسی میزان شایستگی یک کروموزوم ، تابعی جهت محاسبه مقدار نقض قیود نیاز است. در راستای نیل به این هدف ، در این پایان نامه با استعانت از روابط (2-9) و (2-10) تابع جریمه ای براساس پیشنهاد راجیووکریشنامورتی بشرح زیر تعریف می گردد:

$$f_i^{Penalty} = f_i(A) * K * C_i \quad (14-5)$$

که در آن $f_i^{Penalty}$ مقدار تابع جریمه کروموزوم i ام است و C_i ، بیانگر جمع کل نقض‌های صورت گرفته توسط سازه مرتبط با کروموزوم i ام می باشد و بصورت زیر تعریف می شود:

$$C_i = \sum_{j=1}^{Ne} \sum_{k=2}^5 g_{jk}(A) + \sum_{n=1}^{NOJ} g_{n6}(A) \quad ; \quad i=1, \mathbf{K}, nc \quad , \quad n=1, \mathbf{K}, NOJ \quad (15-5)$$

در رابطه فوق:

\mathbf{nc} : تعداد کروموزوم‌های موجود در یک جمعیت (pop-size) می‌باشد.

\mathbf{Ne} : تعداد المان‌های سازه

\mathbf{NOJ} : تعداد گره‌های سازه

پس از محاسبه مقدار تابع جریمه متناظر با هر کروموزوم ، مقدار تابع هدف مربوط به هر کروموزوم بشرح زیر محاسبه می شود:

$$\begin{cases} f_i(A) = \sum_{i=1}^{Ne} (r_i \mathbf{1}_i(J) a_i) & \text{if } \text{Object Function Based On Weight Structure} \\ f_i(A) = \sum_{i=1}^{Ne} (\mathbf{1}_i(J) a_i) & \text{if } \text{Object Function Based On Volume Structure} \end{cases} \quad (16-5)$$

حال با داشتن مقادیر تابع هدف و تابع جریمه متناظر با هر کروموزوم، به راحتی می توان مقدار تابع شایستگی را برای هر رشته حساب نمود.

5-3-6 تابع هدف اصلاح شده و تابع شایستگی مورد استفاده

در این تحقیق جهت محاسبه شایستگی هر کروموزوم با استعانت از روابط (2-13) و (2-14) تابع شایستگی بشرح ذیل انتخاب شده است.

$$F_i = [f_{Max}(A) + f_{Min}(A)] - f_i(A) \quad ; \quad i = 1, \mathbf{K}, nc \quad (17-5)$$

$$f_i(A) = f_i(A) + f_i^{Penalty} \quad ; \quad i = 1, \mathbf{K}, nc \quad (18-5)$$

در روابط فوق همان طور که پیشتر بیان شد؛ $f_i(A)$ ، $f_i^{Penalty}$ ، $f_i(A)$ و F_i به ترتیب تابع هدف، تابع جریمه، تابع هدف اصلاح شده و شایستگی کروموزوم i ام در جمعیت جاری است. $f_{Max}(A)$ و $f_{Min}(A)$ نیز به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل تابع هدف اصلاح شده در جمعیت حاضر می باشد.

براساس روابط (5-17) و (5-18) به طرح هایی با نقض قیود بالا یا $f_i(A)$ بالا، میزان شایستگی کم و بر عکس به طرح های خوب با مقدار تابع هدف اصلاح شده کم، شایستگی بالا اختصاص می دهد.

7-3-5 روش جستجوی چند منظوره

همان طور که در بخش 2-5 اظهار شد ؛ در روش جستجوی چند منظوره (M.S.M) می‌بایست جمعیت GA ، به تعدادی زیر جمعیت تبدیل شود. بنابراین در الگوریتم جستجوی چند منظوره (M.S.A) جهت نیل به این هدف ، پنج جزیره برای طی عملیات بهینه‌یابی سازه‌های فضاکار در نظر گرفته شده است. برای این منظور ، جمعیت GA هر جزیره به طور اختیاری توسط کاربر برنامه به برنامه داده می‌شود. بدین ترتیب کلی‌ترین حالت ممکن در نظر گرفته شده و آزادی عمل برای کاربر حائز اهمیت است.

نرخ مهاجرت در هر جزیره به صورت درصدی از جمعیت آن جزیره در نظر گرفته شده است تا بدین ترتیب برای تعداد جمعیتی که از هر جزیره به جزیره دیگر مهاجرت می‌کنند نیز کلی‌ترین حالت ممکن در نظر گرفته شود.

پس از تشکیل جمعیت در همه جزایر ، هر جزیره بر اساس اسلوب پیشنهادی، پرورش کروموزوم‌ها را سرلوحه کار خود قرار می‌دهد. شیوه هر جزیره با جزایر دیگر اندکی متفاوت است. انتخاب هر یک از متدهای موجود در جزایر ، بر اساس آزمودن کلیه روش‌ها و عملگرهای دنیای GA صورت گرفته است. این روش‌ها و عملگرها در فصل دوم به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است و در جزایر الگوریتم جستجوی چند منظوره به کار گرفته شده است. شرح تفصیلی روش و عملگرهای هر یک از جزایر در ذیل آمده است.

5-3-7-1 جزیره (1)

اطلاعات جزیره (1) را می توان بشرح جدول (1-5) دسته بندی نمود:

جدول (1-5) – اطلاعات جزیره (1)

جزیره (1)

تولید مثل:

جهت تشکیل استخر تولید مثل کروموزوم های والد براساس روش رقابتی با مرتبه (3) انتخاب می شوند.

عملگرهای جزیره (1):

1- عملگر پیوند:

از میان عملگرهای GA عملگر پیوند ، به عنوان اولین عملگر مؤثر بر زیرجمعیت جزیره (1) استفاده شده است. بنابراین در گام ابتدایی ، والدین بر اساس نرخ پیوند از میان استخر تولید مثل انتخاب می شوند ؛ سپس ، والدین بر اساس الگوی پیوند دونقطه ای در هم آمیخته و با تولید فرزندان ، نسل جدیدی را ایجاد می نمایند.

2- عملگر جهش:

پس از انجام عمل پیوند کروموزوم های والد و تولید فرزندان ، نوبت به عملگر جهش می رسد تا تحولی در جمعیت فرزندان ایجاد شود. برای این منظور در جزیره (1) از عملگر جهش با نرخ ثابت استفاده می شده است.

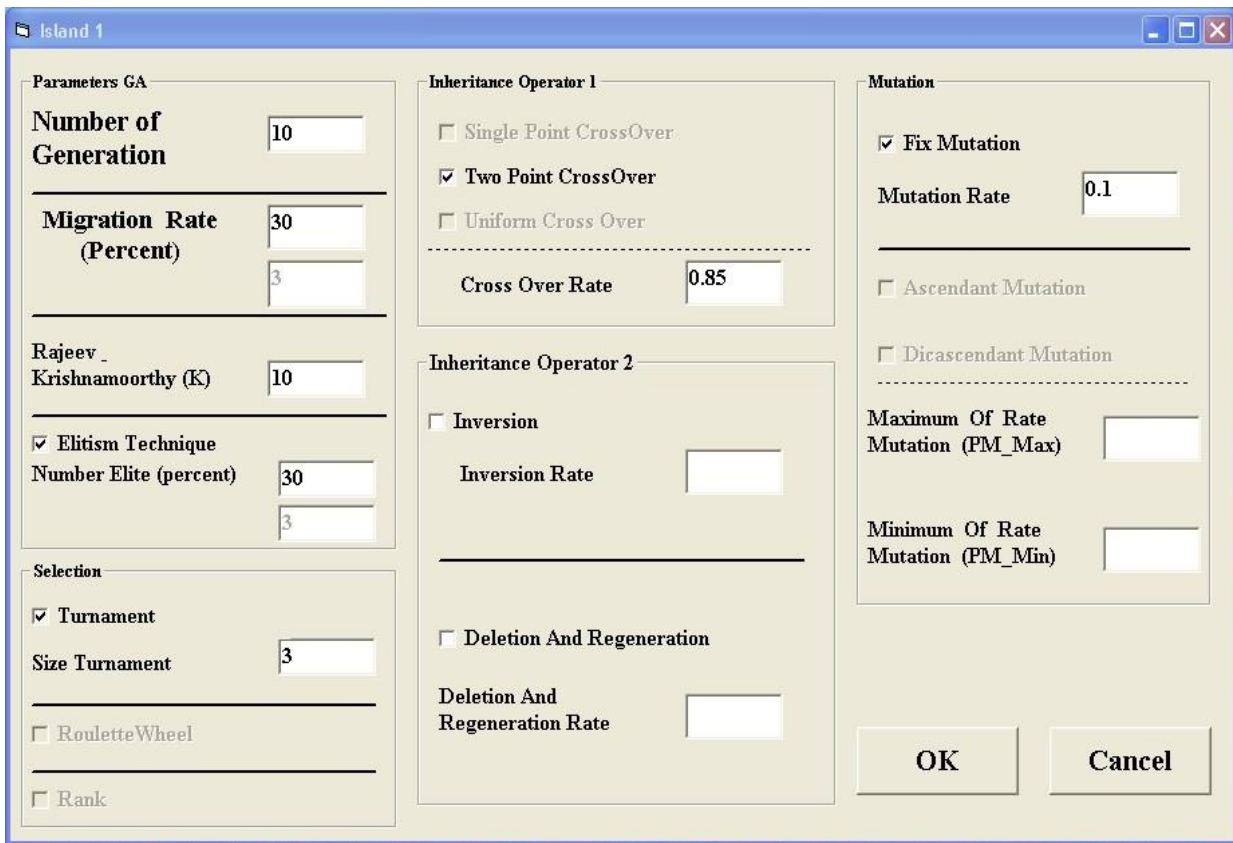
عمل مهاجرت:

در این مرحله با انتخاب مقصد مهاجرت بصورت تصادفی ، بهترین های جزیره (1) به میزان نرخ مهاجرت جزیره (1) اقدام به مهاجرت می نمایند. پس از مهاجرت جمعیت جدید از جزیره دیگری با مقصد جزیره (1) وارد این جزیره می شوند و بدین ترتیب نسل جدید در این جزیره شکل می گیرد.

جمعیت جامع و نهایی:

در نهایت امر نسل نهایی جزیره (1) در گروه جمعیت کل جای می گیرند. باید توجه داشت که در این مرحله موقعیت زیرجمعیت جزیره (1) در جمعیت کلی ثابت و معلوم می باشد. این موضوع سبب می شود تا در تکرار بعدی الگوریتم جستجوی چند منظوره ، زیر جمعیت جزیره (1) به جزیره خویش برگردد.

برای وارد نمودن اطلاعات جزیره (1) از پنجره Island (1) استفاده می شود. شکل (5-5) پنجره Island (1) را نشان می دهد.



شکل (4-5) - پنجره ورودی اطلاعات جزیره (1)

پنجره (1) Island با علامت دار نمودن گزینه¹ مربوطه در پنجره GA ظاهر می شود. همان طور که در شکل (4-5) مشاهده می شود، براساس این پنجره اطلاعاتی همچون تعداد جمعیت، نرخ مهاجرت، ثابت k برای تابع هدف اصلاح شده، نرخ پیوند و نرخ جهش به همراه مرتبه (سایز رقابت) روش رقابتی توسط کاربر² به برنامه داده می شود. سایز رقابت در جزیره (1) همواره برابر سه در نظر گرفته می شود؛ اما این موضوع قابل تغییر است و می توان متناسب با شرایط مسئله آن را تغییر داد.

پس از وارد نمودن اطلاعات، با فشردن دکمه Ok، اطلاعات در متغیرهای جزیره (1) ذخیره می شوند.

¹ . Option

² . User

2-7-3-5 جزیره (2)

اطلاعات جزیره (2) را می توان بشرح جدول (2-5) دسته بندی نمود:

جدول (2-5) - اطلاعات جزیره (2)

جزیره (2)

تولید مثل:

جهت تشکیل استخر تولید مثل کروموزوم های والد براساس روش رقابتی با سایز (2) انتخاب می شوند.

عملگرهای جزیره (2):

1- عملگر پیوند:

از میان عملگرهای GA عملگر پیوند ، به عنوان اولین عملگر مؤثر بر زیرجمعیت جزیره (2) استفاده شده است. بنابراین در گام ابتدایی ، والدین بر اساس نرخ پیوند از میان استخر تولید مثل انتخاب می شوند ؛ سپس ، والدین بر اساس الگوی پیوند یکنواخت در هم آمیخته و با تولید فرزندان ، نسل جدیدی را ایجاد می نمایند.

2- عملگر جهش:

پس از انجام عمل پیوند کروموزوم های والد و تولید فرزندان ، نوبت به عملگر جهش می رسد تا تحولی در جمعیت فرزندان ایجاد شود. برای این منظور در جزیره (2) از عملگر جهش با نرخ نزولی استفاده شده است.

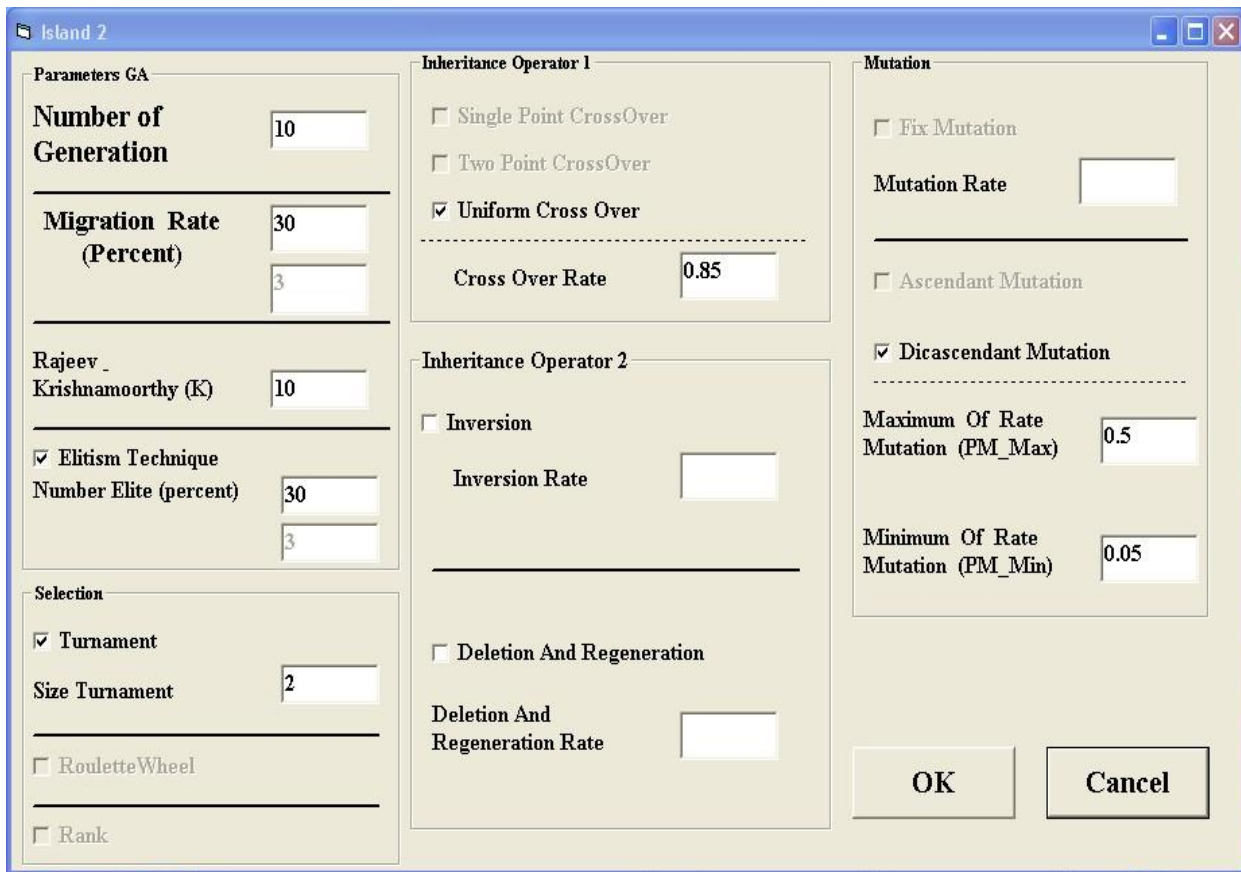
عمل مهاجرت:

در این مرحله با انتخاب مقصد مهاجرت بصورت تصادفی ، بهترین‌های جزیره (2) به میزان نرخ مهاجرت جزیره (2) اقدام به مهاجرت می‌نمایند. پس از مهاجرت جمعیت جدید از جزیره دیگری با مقصد جزیره (2) وارد این جزیره می‌شوند و بدین ترتیب نسل جدید در این جزیره شکل می‌گیرد.

جمعیت جامع و نهایی:

در نهایت امر نسل نهایی جزیره (2) در گروه جمعیت کل جای می‌گیرند. باید توجه داشت که در این مرحله موقعیت زیرجمعیت جزیره (2) در جمعیت کلی ثابت و معلوم می‌باشد. این موضوع سبب می‌شود تا در تکرار بعدی الگوریتم جستجوی چند منظوره ، زیر جمعیت جزیره (2) به جزیره خویش برگردد.

برای وارد نمودن اطلاعات جزیره (2) از پنجره Island (2) استفاده می‌شود. شکل (5-6) پنجره Island (2) را نشان می‌دهد.



شکل (5-5) - پنجره ورودی اطلاعات جزیره (2)

پنجره (2) Island با علامت دار نمودن گزینه مربوطه در پنجره GA ظاهر می شود. همان طور که در شکل (5-5) مشاهده می شود ، براساس این پنجره اطلاعاتی همچون تعداد جمعیت، نرخ مهاجرت، ثابت k برای تابع هدف اصلاح شده ، نرخ پیوند و مرتبه (سایز رقابت) روش رقابتی به همراه مقادیر حداکثر و حداقل نرخ جهش توسط کاربر به برنامه داده می شود. سایز رقابت در جزیره (2) همواره برابر دو در نظر گرفته می شود ؛ اما این موضوع قابل تغییر است و می توان متناسب با شرایط مسئله آن را تغییر داد.

پس از وارد نمودن اطلاعات ، با فشردن دکمه Ok ، اطلاعات در متغیرهای جزیره (2) ذخیره می شوند.

3-7-3-5 جزیره (3)

اطلاعات جزیره (3) را می توان بشرح جدول (3-5) دسته بندی نمود:

جدول (3-5) – اطلاعات جزیره (3)

جزیره (3)

تولید مثل:

جهت تشکیل استخر تولید مثل کروموزوم های والد براساس روش چرخ گردان انتخاب می شوند.

عملگرهای جزیره (3):

1- عملگر پیوند و معکوس سازی:

از میان عملگرهای GA عملگرهای پیوند تک نقطه ایی و معکوس سازی ، به عنوان اولین عملگر مؤثر بر زیرجمعیت جزیره (3) استفاده شده است. بنابراین در گام ابتدایی ، والدین بر اساس نرخ پیوند تک نقطه ایی و معکوس سازی از میان استخر تولید مثل انتخاب می شوند ؛ سپس ، والدین بر اساس الگوی پیوند تک نقطه ایی و معکوس سازی در هم آمیخته و با تولید فرزندان ، نسل جدیدی را ایجاد می نمایند.

2- عملگر جهش:

پس از انجام عمل پیوند کروموزوم های والد و تولید فرزندان ، نوبت به عملگر جهش می رسد تا تحولی در جمعیت فرزندان ایجاد شود. برای این منظور در جزیره (3) از عملگر جهش با نرخ نزولی استفاده شده است.

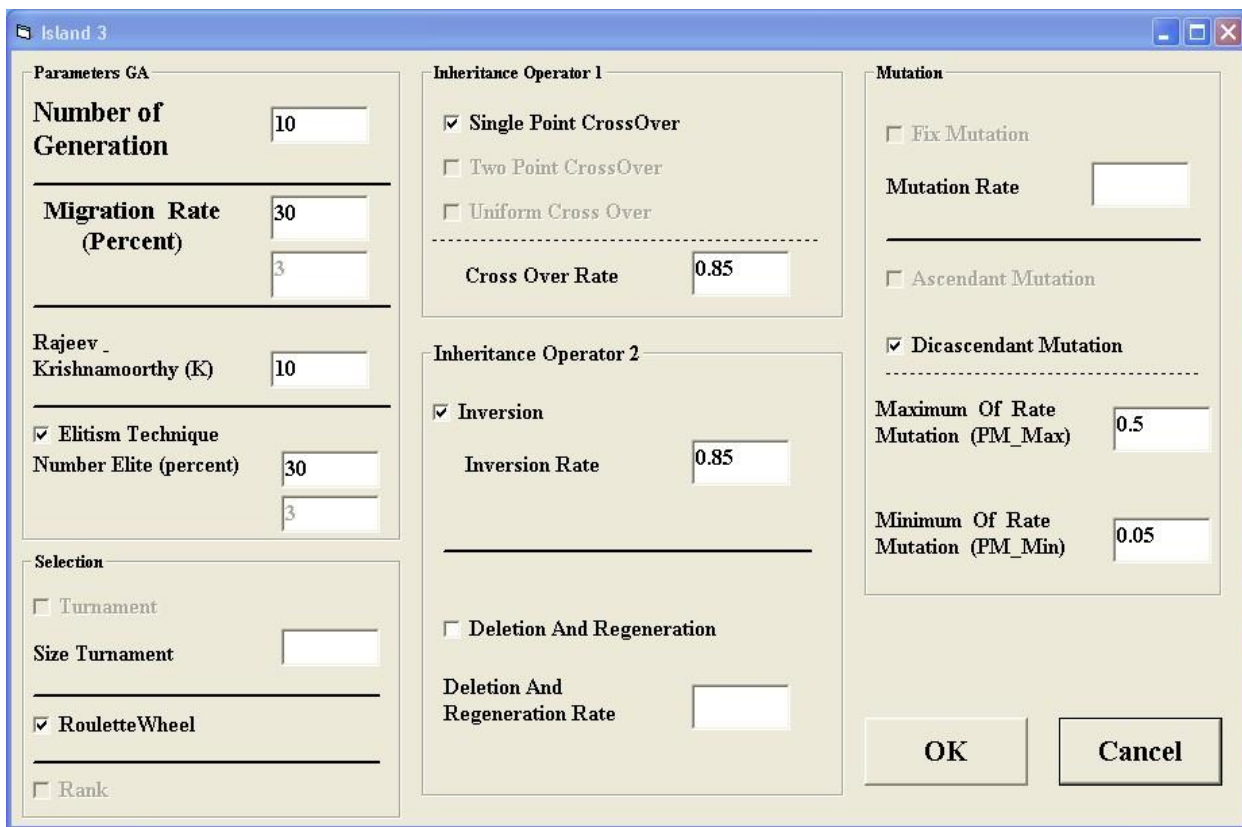
عمل مهاجرت:

در این مرحله با انتخاب مقصد مهاجرت بصورت تصادفی ، بهترین‌های جزیره (3) به میزان نرخ مهاجرت جزیره (3) اقدام به مهاجرت می‌نمایند. پس از مهاجرت جمعیت جدید از جزیره دیگری با مقصد جزیره (3) وارد این جزیره می‌شوند و بدین ترتیب نسل جدید در این جزیره شکل می‌گیرد.

جمعیت جامع و نهایی:

در نهایت امر نسل نهایی جزیره (3) در گروه جمعیت کل جای می‌گیرند. باید توجه داشت که در این مرحله موقعیت زیرجمعیت جزیره (3) در جمعیت کلی ثابت و معلوم می‌باشد. این موضوع سبب می‌شود تا در تکرار بعدی الگوریتم جستجوی چند منظوره ، زیر جمعیت جزیره (3) به جزیره خویش برگردد.

برای وارد نمودن اطلاعات جزیره (3) از پنجره (3) Island استفاده می‌شود. شکل (5-7) پنجره (3) Island را نشان می‌دهد.



شکل (5-6) - پنجره ورودی اطلاعات جزیره (3)

پنجره (3) Island با علامت دار نمودن گزینه مربوطه در پنجره GA ظاهر می شود. همان طور که در شکل (5-6) مشاهده می شود ، براساس این پنجره اطلاعاتی همچون تعداد جمعیت، نرخ مهاجرت، ثابت k برای تابع هدف اصلاح شده ، نرخ پیوند و معکوس سازی به همراه مقادیر حداکثر و حداقل نرخ جهش توسط کاربر به برنامه داده می شود. لازم به ذکر است که عمل معکوس سازی در جزیره (3) ، براساس معکوس سازی بیت ها پی ریزی شده است.

پس از وارد نمودن اطلاعات ، با فشردن دکمه Ok ، اطلاعات در متغیرهای جزیره (3) ذخیره می شوند.

4-7-3-5 جزیره (4)

اطلاعات جزیره (4) را می توان بشرح جدول (4-5) دسته بندی نمود:

جدول (4-5) – اطلاعات جزیره (4)

جزیره (4)

تولید مثل:

جهت تشکیل استخر تولید مثل کروموزوم های والد براساس روش رتبه بندی انتخاب می شوند.

عملگرهای جزیره (4):

1- عملگر پیوند و معکوس سازی:

از میان عملگرهای GA عملگرهای پیوند دو نقطه ایی و معکوس سازی ، به عنوان اولین عملگر مؤثر بر زیرجمعیت جزیره (4) استفاده شده است. بنابراین در گام ابتدایی ، والدین بر اساس نرخ پیوند دو نقطه ایی و معکوس سازی از میان استخر تولید مثل انتخاب می شوند ؛ سپس ، والدین بر اساس الگوی پیوند و معکوس سازی در هم آمیخته و با تولید فرزندان ، نسل جدیدی را ایجاد می نمایند.

2- عملگر جهش:

پس از انجام عمل پیوند کروموزوم های والد و تولید فرزندان ، نوبت به عملگر جهش می رسد تا تحولی در جمعیت فرزندان ایجاد شود. برای این منظور در جزیره (4) از عملگر جهش با نرخ

صعودی استفاده شده است.

عمل مهاجرت:

در این مرحله با انتخاب مقصد مهاجرت بصورت تصادفی ، بهترین‌های جزیره (4) به میزان نرخ مهاجرت جزیره (4) اقدام به مهاجرت می‌نمایند. پس از مهاجرت جمعیت جدید از جزیره دیگری با مقصد جزیره (4) وارد این جزیره می‌شوند و بدین ترتیب نسل جدید در این جزیره شکل می‌گیرد.

جمعیت جامع و نهایی:

در نهایت امر نسل نهایی جزیره (4) در گروه جمعیت کل جای می‌گیرند. باید توجه داشت که در این مرحله موقعیت زیرجمعیت جزیره (4) در جمعیت کلی ثابت و معلوم می‌باشد. این موضوع سبب می‌شود تا در تکرار بعدی الگوریتم جستجوی چند منظوره ، زیر جمعیت جزیره (4) به جزیره خویش برگردد.

برای وارد نمودن اطلاعات جزیره (4) از پنجره Island (4) استفاده می‌شود. شکل (5-8) پنجره Island (4) را نشان می‌دهد.

شکل (7-5) - پنجره ورودی اطلاعات جزیره (4)

پنجره (4) Island با علامت دار نمودن گزینه مربوطه در پنجره GA ظاهر می شود. همان طور که در شکل (7-5) مشاهده می شود، براساس این پنجره اطلاعاتی همچون تعداد جمعیت، نرخ مهاجرت، ثابت k برای تابع هدف اصلاح شده، نرخ پیوند و معکوس سازی به همراه مقادیر حداکثر و حداقل نرخ جهش توسط کاربر به برنامه داده می شود. لازم به ذکر است که عمل معکوس سازی در جزیره (4)، براساس معکوس سازی بیت ها پی ریزی شده است.

پس از وارد نمودن اطلاعات، با فشردن دکمه **OK**، اطلاعات در متغیرهای جزیره (4) ذخیره می شوند.

5-3-7-5 جزیره (5)

اطلاعات جزیره (5) را می توان بشرح جدول (5-5) دسته بندی نمود:

جدول (5-5) – اطلاعات جزیره (5)

جزیره (5)

تولید مثل:

جهت تشکیل استخر تولید مثل کروموزوم های والد براساس روش رقابتی با مرتبه (3) انتخاب می شوند.

عملگرهای جزیره (5):

1- عملگر پیوند و عمل حذف و تولید مجدد:

از میان عملگرهای GA عملگر پیوند دو نقطه ایی و عمل حذف و تولید مجدد ، به عنوان اولین عملگر مؤثر بر زیرجمعیت جزیره (5) استفاده شده است. بنابراین در گام ابتدایی ، والدین بر اساس نرخ پیوند دو نقطه ایی و عمل حذف و تولید مجدد از میان استخر تولید مثل انتخاب می شوند ؛ سپس ، والدین بر اساس الگوی پیوند و عمل حذف و تولید مجدد در هم آمیخته و با تولید فرزندان ، نسل جدیدی را ایجاد می نمایند.

2- عملگر جهش:

پس از انجام عمل پیوند کروموزوم های والد و تولید فرزندان ، نوبت به عملگر جهش می رسد تا تحولی در جمعیت فرزندان ایجاد شود. برای این منظور در جزیره (5) از عملگر جهش با نرخ

صعودی استفاده شده است.

عمل مهاجرت:

در این مرحله با انتخاب مقصد مهاجرت بصورت تصادفی ، بهترین‌های جزیره (5) به میزان نرخ مهاجرت جزیره (5) اقدام به مهاجرت می‌نمایند. پس از مهاجرت جمعیت جدید از جزیره دیگری با مقصد جزیره (5) وارد این جزیره می‌شوند و بدین ترتیب نسل جدید در این جزیره شکل می‌گیرد.

جمعیت جامع و نهایی:

در نهایت امر نسل نهایی جزیره (5) در گروه جمعیت کل جای می‌گیرند. باید توجه داشت که در این مرحله موقعیت زیرجمعیت جزیره (5) در جمعیت کلی ثابت و معلوم می‌باشد. این موضوع سبب می‌شود تا در تکرار بعدی الگوریتم جستجوی چند منظوره ، زیر جمعیت جزیره (5) به جزیره خویش برگردد.

برای وارد نمودن اطلاعات جزیره (5) از پنجره (5) Island استفاده می‌شود. شکل (5-9) پنجره (5) Island را نشان می‌دهد.

شکل (5-8) - پنجره ورودی اطلاعات جزیره (5)

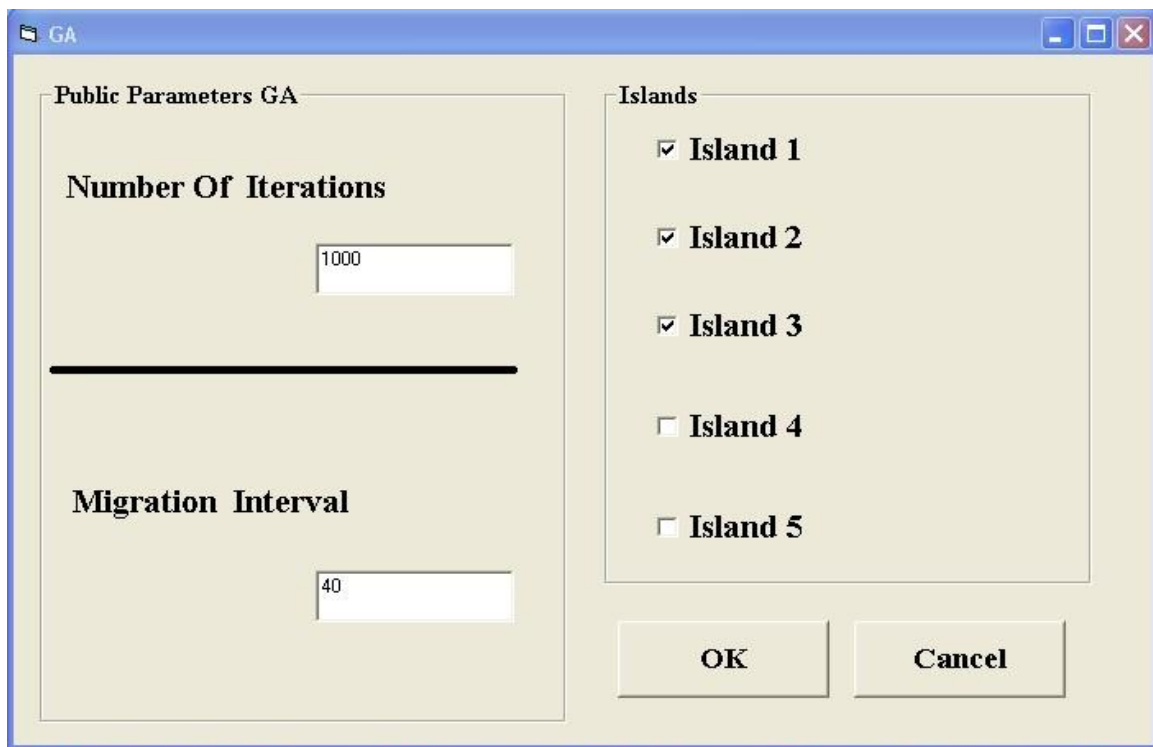
پنجره (5) Island با علامت دار نمودن گزینه مربوطه در پنجره GA ظاهر می‌شود. همان طور که در شکل (5-8) مشاهده می‌شود، براساس این پنجره اطلاعاتی همچون تعداد جمعیت، نرخ مهاجرت، ثابت k برای تابع هدف اصلاح شده، نرخ عمل ادغام و حذف و تولید مجدد به همراه مقادیر حداکثر و حداقل نرخ جهش توسط کاربر به برنامه داده می‌شود.

پس از وارد نمودن اطلاعات، با فشردن دکمه **OK**، اطلاعات در متغیرهای جزیره (5) ذخیره می‌شوند.

در تمام جزایر از شایسته سالاری استفاده شده است. با این تفاوت که به صورت پیشنهادی میزان شایسته سالاری به صورت درصدی از جمعیت در نظر گرفته شده است تا کلی ترین حالت ممکن در نظر گرفته شود. این امر نیز در سرعت دستیابی به سازه بهینه موثر بوده است .

در تمامی جزایر مطروحه پنجره GA ، به عنوان پنجره مبنا ، جهت ورود اطلاعات GA و فراخوانی جزایر معرفی شده است. این پنجره در شکل (5-9) نشان داده شده است.

براساس این پنجره اطلاعاتی میزان تکرار¹ و نسل سازی به عنوان ورودی های عمومی² GA توسط کاربر اعلام می گردند. وقفه مهاجرت نیز از جمله اطلاعاتی می باشد که می بایست توسط کاربر اعلام گردد. این اطلاعات مختص الگوریتم جستجوی چند منظوره (M.S.A) می باشند.



شکل (5-9) – پنجره ورودی اطلاعات GA و فراخوانی جزایر

¹ . Iteration

² . Public

در سوی دیگر پنجره GA ، همان طور که بارز است با علامت‌دار نمودن هر یک از گزینه‌های مربوط به جزایر ، جزیره مربوطه فراخوانی شده و ظاهر می گردد. در نهایت امر ، با فشردن دکمه فرمان OK اطلاعات ورودی در حافظه برنامه ذخیره می شوند.

8-3-5 روش پیشنهادی (اصلاح ژنتیکی کروموزوم)

همانطور که گفته شد در سازه‌هایی که قیود مسئله مورد بررسی زیاد، تعدادمتغیرها و در نتیجه فضای کاوش نیز زیاد باشد. روند دستیابی به سازه بهینه بسیار کند و با صرف زمان بسیار زیاد امکان‌پذیر می‌گردد. برای حل این مشکل زیر برنامه‌ای نوشته شده است که در هنگام بررسی قیود طراحی در صورتیکه قید مورد نظر اغناء نشود متغیر مربوط به این قید شناسایی و پس از تشخیص محل آن در کروموزوم مربوطه مقدار آن به طور موضعی تغییر می‌یابد.

این تغییر به دو صورت می‌تواند رخ دهد حالت اول به صورت تصادفی است. در این حالت بعد از اینکه زیر رشته کروموزوم مربوطه که دارای نقض قید است شناسایی شد به صورت تصادفی بیت‌های آن تغییر می‌کند. حالت دوم به صورت غیر تصادفی و جهت‌دار می‌باشد در این حالت به‌طور مثال هنگامی که قید تنش نقض شد و عضوی ضعیف بود سطح مقطع آن افزایش می‌یابد. بنابراین بیت‌ها به گونه‌ای تغییر می‌کنند که هدف خواسته شده را انجام دهند.

این امر می‌تواند برای متغیرهایی که نسبت قید طراحی وابسته به آن‌ها از مقدار مجاز آن قید بسیار کمتر است به صورت معکوس انجام بپذیرد . برای مثال هنگامی که نسبت تنش المان مورد نظر با تنش مجاز بسیار کوچک است می‌توان زیر رشته مورد نظر را به گونه‌ای تغییر داد که باعث کاهش سطح مقطع شود و در نتیجه سبب سریعتر شدن سرعت بهینه‌یابی شود.

بنابر این روش فوق به دو صورت به امر بهینه‌یابی کمک می‌کند هم باعث کاهش نقض‌های طراحی شده و هم باعث کاهش وزن می‌شود.

5-3-9 بررسی همگرایی و کنترل تعداد مراحل نسل سازی

همان‌طور که در فصل سوم بیان شد؛ روش‌های متنوعی جهت بررسی شرط خاتمه در الگوریتم‌های ژنتیک وجود دارد. در این پایان‌نامه، شرط خاتمه الگوریتم با کنترل تعداد مراحل نسل‌سازی اغناء می‌شود. به عبارت دیگر شرط همگرایی، سپری شدن تعداد مشخصی از نسل‌ها که توسط کاربر مشخص می‌گردد؛ تعیین شده است. تعیین تعداد تکرار (تعداد نسل‌های تولید شده) جهت خاتمه الگوریتم مقداری اختیاری بوده و به تعداد اعضای سازه موردنظر جهت بهینه‌یابی بستگی دارد. زمانی که شرط خاتمه (تکمیل نسل‌سازی) اغناء شود، الگوریتم جستجوی چند منظوره (M.S.A) بهترین کروموزوم نسل حاضر (آخرین نسل) را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید و جهت رسم توپولوژی نهایی و اعلام مقاطع بهینه به زیرنامه چاپ خروجی¹ می‌فرستد.

¹ . Print Output

فصل ششم:

مسائل هائی عددی

6-1 مقدمه

در این فصل جهت صحت سنجی و بررسی توانمندی الگوریتم جستجوی چند منظوره (M.S.A) و روش پیشنهادی اصلاح ژنتیکی کروموزوم، چند مثال عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بررسی های به عمل آمده سعی شده است تا تمامی مفروضات با مثال های مرجع یکسان باشد.

6-2 صحت سنجی برنامه ویژوال بیسیک

برای بررسی درستی نتایج تحلیل سازه برنامه نوشته شده در محیط ویژوال بیسیک، خروجی برنامه با برنامه sap2000 ورژن 14 مقایسه شده است. در هر دو برنامه جنس مصالح و توپولوژی سازه یکسان در نظر گرفته شده است (شکل 6-1).

✓ مدول الاستیسیته $E=2038902$ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

✓ تنش جاری شدن مصالح $F_y=2400$ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

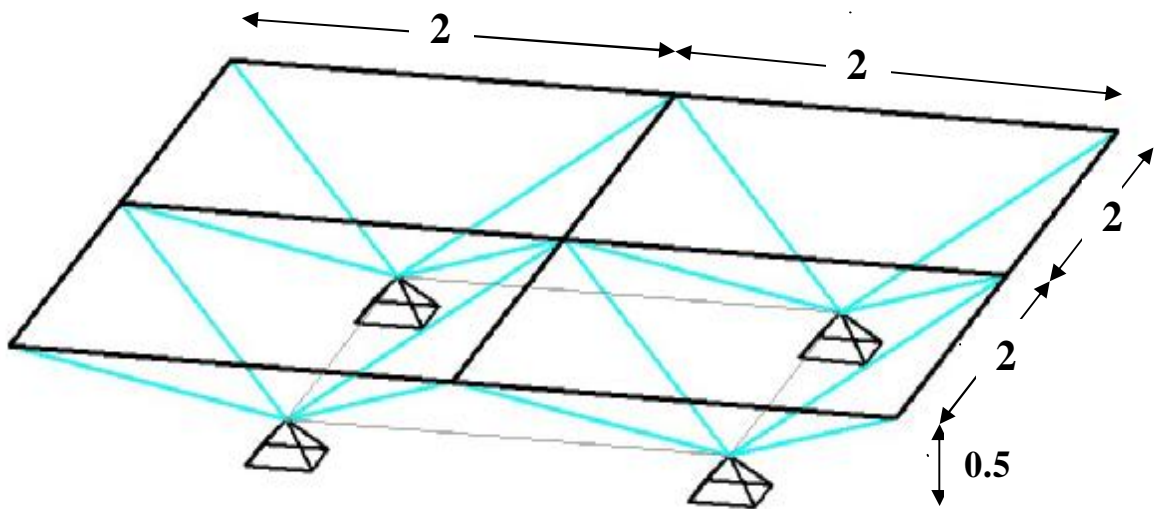
✓ وزن واحد حجم $W=7850$ کیلوگرم بر متر مکعب

✓ بار مرده سقف $DL=180$ کیلوگرم بر متر مربع

✓ تکیه گاه‌ها در 4 گره لایه پایین قرار دارند .

✓ طول المان‌ها 2 متر فرض شده است

✓ ارتفاع سازه 0.5 متر فرض شده است.



شکل (1-6) سازه فضاکار تخت دو لایه 2×2

یکی از خروجی های برنامه مختصات گرهی و شماره گذاری گرهی می باشد که مطابق با جدول (1-6) می باشد.

جدول (1-6) مختصات نقاط گرهی

شماره گرهی	X	Y	Z
joint 1	x= 0	y= 0	z= 50
joint 2	x= 200	y= 0	z= 50
joint 3	x= 400	y= 0	z= 50
joint 4	x= 0	y= 200	z= 50
joint 5	x= 200	y= 200	z= 50
joint 6	x= 400	y= 200	z= 50
joint 7	x= 0	y= 400	z= 50
joint 8	x= 200	y= 400	z= 50
joint 9	x= 400	y= 400	z= 50
joint 10	x= 100	y= 100	z= 0
joint 11	x= 300	y= 100	z= 0
joint 12	x= 100	y= 300	z= 0
joint 13	x= 300	y= 300	z= 0

مختصات محل تکیه گاه ها نیز مطابق جدول (2-6) می باشد.

جدول (2-6) مختصات نقاط تکیه گاهی

SUPPORT 1	10
SUPPORT 2	11
SUPPORT 3	12
SUPPORT 4	13

شماره گذاری المان و مختصات نقاط گرهی دو سمت المان ، سطح مقطع المان بر حسب سانتی متر

مربع و طول المان بر حسب سانتی متر به قرار جدول (3-6) می باشد.

جدول (3-6) مشخصات المان های سازه

شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	طول المان
Eleman 1	i = 1	j = 2	3.94	200
Eleman 2	i = 2	j = 3	3.94	200
Eleman 3	i = 4	j = 5	3.94	200
Eleman 4	i = 5	j = 6	3.94	200
Eleman 5	i = 7	j = 8	3.94	200
Eleman 6	i = 8	j = 9	3.94	200
Eleman 7	i = 1	j = 4	3.94	200
Eleman 8	i = 2	j = 5	3.94	200
Eleman 9	i = 3	j = 6	3.94	200
Eleman 10	i = 4	j = 7	3.94	200
Eleman 11	i = 5	j = 8	3.94	200
Eleman 12	i = 6	j = 9	3.94	200
Eleman 13	i = 10	j = 11	3.94	200
Eleman 14	i = 12	j = 13	3.94	200
Eleman 15	i = 10	j = 12	3.94	200
Eleman 16	i = 11	j = 13	3.94	200
Eleman 17	i = 1	j = 10	3.94	150
Eleman 18	i = 2	j = 10	3.94	150
Eleman 19	i = 4	j = 10	3.94	150
Eleman 20	i = 5	j = 10	3.94	150
Eleman 21	i = 2	j = 11	3.94	150
Eleman 22	i = 3	j = 11	3.94	150
Eleman 23	i = 5	j = 11	3.94	150
Eleman 24	i = 6	j = 11	3.94	150
Eleman 25	i = 4	j = 12	3.94	150
Eleman 26	i = 5	j = 12	3.94	150
Eleman 27	i = 7	j = 12	3.94	150
Eleman 28	i = 8	j = 12	3.94	150
Eleman 29	i = 5	j = 13	3.94	150
Eleman 30	i = 6	j = 13	3.94	150
Eleman 31	i = 8	j = 13	3.94	150
Eleman 32	i = 9	j = 13	3.94	150

همچنین بر اساس برنامه نوشته شده بارگذاری وارد بر سازه مطابق جدول (4-6) ایجاد می شود.

جدول (4-6) بارگذاری گرهی

بارگذاری وارد بر گره	نیرو
Force X1	0.0
Force Y1	0.0
Force Z1	-188.5
Force X2	0.0
Force Y2	0.0
Force Z2	-373.9
Force X3	0.0
Force Y3	0.0
Force Z3	-188.5
Force X4	0.0
Force Y4	0.0
Force Z4	-373.9
Force X5	0.0
Force Y5	0.0
Force Z5	-741.7
Force X6	0.0
Force Y6	0.0
Force Z6	-373.9
Force X7	0.0
Force Y7	0.0
Force Z7	-188.5

بارگذاری وارد بر گره	نیرو
Force X8	0.0
Force Y8	0.0
Force Z8	-373.9
Force X9	0.0
Force Y9	0.0
Force Z9	-188.5
Force X10	0.0
Force Y10	0.0
Force Z10	-15.5
Force X11	0.0
Force Y11	0.0
Force Z11	-15.5
Force X12	0.0
Force Y12	0.0
Force Z12	-15.5
Force X13	0.0
Force Y13	0.0
Force Z13	-15.5

نتایج تحلیل برنامه در جدول (5-6) نمایش داده شده است.

جدول (5-6) : تنش‌ها و نیروهای داخلی اعضا

المان	تنش	بار محوری
1	95.7	382.8
2	95.7	382.8
3	189.8	759.4
4	189.8	759.4
5	95.7	382.8
6	95.7	382.8
7	95.7	382.8
8	189.8	759.4
9	95.7	382.8
10	95.7	382.8
11	189.8	759.4
12	95.7	382.8
13	0.0	0.0
14	0.0	0.0
15	0.0	0.0
16	0.0	0.0
17	-143.3	-573.2
18	-142.1	-568.5
19	-142.1	-568.5
20	-141.1	-564.6
21	-142.1	-568.5
22	-143.3	-573.2
23	-141.1	-564.6
24	-142.1	-568.5
25	-142.1	-568.5
26	-141.1	-564.6
27	-143.3	-573.2
28	-142.1	-568.5
29	-141.1	-564.6
30	-142.1	-568.5
31	-142.1	-568.5
32	-143.3	-573.2
	kg/cm ²	kg

خروجی برنامه sap 2000

جدول (6-6) : خروجی برنامه sap2000

Table: Connectivity – Frame

Table: Connectivity - Frame								
Frame	JointI	JointJ	IsCurved	Length m	CentroidX m	CentroidY m	CentroidZ m	
1	1	2	No	2.00000	1.00000	0.00000	0.50000	
2	2	3	No	2.00000	3.00000	0.00000	0.50000	
3	4	5	No	2.00000	1.00000	2.00000	0.50000	
4	5	6	No	2.00000	3.00000	2.00000	0.50000	
5	7	8	No	2.00000	1.00000	4.00000	0.50000	
6	8	9	No	2.00000	3.00000	4.00000	0.50000	
7	1	4	No	2.00000	0.00000	1.00000	0.50000	
8	2	5	No	2.00000	2.00000	1.00000	0.50000	
9	3	6	No	2.00000	4.00000	1.00000	0.50000	
10	4	7	No	2.00000	0.00000	3.00000	0.50000	
11	5	8	No	2.00000	2.00000	3.00000	0.50000	
12	6	9	No	2.00000	4.00000	3.00000	0.50000	
13	1	10	No	1.50000	0.50000	0.50000	0.25000	
14	2	10	No	1.50000	1.50000	0.50000	0.25000	
15	4	10	No	1.50000	0.50000	1.50000	0.25000	
16	5	10	No	1.50000	1.50000	1.50000	0.25000	
17	2	11	No	1.50000	2.50000	0.50000	0.25000	
18	3	11	No	1.50000	3.50000	0.50000	0.25000	
19	5	11	No	1.50000	2.50000	1.50000	0.25000	
20	6	11	No	1.50000	3.50000	1.50000	0.25000	
21	4	12	No	1.50000	0.50000	2.50000	0.25000	
22	5	12	No	1.50000	1.50000	2.50000	0.25000	
23	7	12	No	1.50000	0.50000	3.50000	0.25000	
24	8	12	No	1.50000	1.50000	3.50000	0.25000	
25	5	13	No	1.50000	2.50000	2.50000	0.25000	
26	6	13	No	1.50000	3.50000	2.50000	0.25000	
27	8	13	No	1.50000	2.50000	3.50000	0.25000	
28	9	13	No	1.50000	3.50000	3.50000	0.25000	
29	10	11	No	2.00000	2.00000	1.00000	0.00000	
30	12	13	No	2.00000	2.00000	3.00000	0.00000	
31	10	12	No	2.00000	1.00000	2.00000	0.00000	
32	11	13	No	2.00000	3.00000	2.00000	0.00000	

Table: Element Forces - Frames

Table: Element Forces - Frames				
Frame	Station m	OutputCase	CaseType	P Kgf
1	0.00000	D	Combination	377.01
1	0.50000	D	Combination	377.01
1	1.00000	D	Combination	377.01
1	1.50000	D	Combination	377.01
1	2.00000	D	Combination	377.01
2	0.00000	D	Combination	377.01
2	0.50000	D	Combination	377.01
2	1.00000	D	Combination	377.01
2	1.50000	D	Combination	377.01
2	2.00000	D	Combination	377.01
3	0.00000	D	Combination	747.84
3	0.50000	D	Combination	747.84
3	1.00000	D	Combination	747.84

Table: Element Forces - Frames

Frame	Station m	OutputCase	CaseType	P Kgf
3	1.50000	D	Combination	747.84
3	2.00000	D	Combination	747.84
4	0.00000	D	Combination	747.84
4	0.50000	D	Combination	747.84
4	1.00000	D	Combination	747.84
4	1.50000	D	Combination	747.84
4	2.00000	D	Combination	747.84
5	0.00000	D	Combination	377.01
5	0.50000	D	Combination	377.01
5	1.00000	D	Combination	377.01
5	1.50000	D	Combination	377.01
5	2.00000	D	Combination	377.01
6	0.00000	D	Combination	377.01
6	0.50000	D	Combination	377.01
6	1.00000	D	Combination	377.01
6	1.50000	D	Combination	377.01
6	2.00000	D	Combination	377.01
7	0.00000	D	Combination	377.01
7	0.50000	D	Combination	377.01
7	1.00000	D	Combination	377.01
7	1.50000	D	Combination	377.01
7	2.00000	D	Combination	377.01
8	0.00000	D	Combination	747.84
8	0.50000	D	Combination	747.84
8	1.00000	D	Combination	747.84
8	1.50000	D	Combination	747.84
8	2.00000	D	Combination	747.84
9	0.00000	D	Combination	377.01
9	0.50000	D	Combination	377.01
9	1.00000	D	Combination	377.01
9	1.50000	D	Combination	377.01
9	2.00000	D	Combination	377.01
10	0.00000	D	Combination	377.01
10	0.50000	D	Combination	377.01
10	1.00000	D	Combination	377.01
10	1.50000	D	Combination	377.01
10	2.00000	D	Combination	377.01
11	0.00000	D	Combination	747.84
11	0.50000	D	Combination	747.84
11	1.00000	D	Combination	747.84
11	1.50000	D	Combination	747.84
11	2.00000	D	Combination	747.84
12	0.00000	D	Combination	377.01
12	0.50000	D	Combination	377.01
12	1.00000	D	Combination	377.01
12	1.50000	D	Combination	377.01
12	2.00000	D	Combination	377.01
13	0.00000	D	Combination	-564.75
13	0.75000	D	Combination	-565.52
13	1.50000	D	Combination	-566.30
14	0.00000	D	Combination	-560.11
14	0.75000	D	Combination	-560.88
14	1.50000	D	Combination	-561.65
15	0.00000	D	Combination	-560.11
15	0.75000	D	Combination	-560.88
15	1.50000	D	Combination	-561.65
16	0.00000	D	Combination	-555.47
16	0.75000	D	Combination	-556.24
16	1.50000	D	Combination	-557.01
17	0.00000	D	Combination	-560.11
17	0.75000	D	Combination	-560.88
17	1.50000	D	Combination	-561.65
18	0.00000	D	Combination	-564.75
18	0.75000	D	Combination	-565.52

Table: Element Forces - Frames

Frame	Station m	OutputCase	CaseType	P Kgf
18	1.50000	D	Combination	-566.30
19	0.00000	D	Combination	-555.47
19	0.75000	D	Combination	-556.24
19	1.50000	D	Combination	-557.01
20	0.00000	D	Combination	-560.11
20	0.75000	D	Combination	-560.88
20	1.50000	D	Combination	-561.65
21	0.00000	D	Combination	-560.11
21	0.75000	D	Combination	-560.88
21	1.50000	D	Combination	-561.65
22	0.00000	D	Combination	-555.47
22	0.75000	D	Combination	-556.24
22	1.50000	D	Combination	-557.01
23	0.00000	D	Combination	-564.75
23	0.75000	D	Combination	-565.52
23	1.50000	D	Combination	-566.30
24	0.00000	D	Combination	-560.11
24	0.75000	D	Combination	-560.88
24	1.50000	D	Combination	-561.65
25	0.00000	D	Combination	-555.47
25	0.75000	D	Combination	-556.24
25	1.50000	D	Combination	-557.01
26	0.00000	D	Combination	-560.11
26	0.75000	D	Combination	-560.88
26	1.50000	D	Combination	-561.65
27	0.00000	D	Combination	-560.11
27	0.75000	D	Combination	-560.88
27	1.50000	D	Combination	-561.65
28	0.00000	D	Combination	-564.75
28	0.75000	D	Combination	-565.52
28	1.50000	D	Combination	-566.30
29	0.00000	D	Combination	0.00
29	0.50000	D	Combination	0.00
29	1.00000	D	Combination	0.00
29	1.50000	D	Combination	0.00
29	2.00000	D	Combination	0.00
30	0.00000	D	Combination	0.00
30	0.50000	D	Combination	0.00
30	1.00000	D	Combination	0.00
30	1.50000	D	Combination	0.00
30	2.00000	D	Combination	0.00
31	0.00000	D	Combination	0.00
31	0.50000	D	Combination	0.00
31	1.00000	D	Combination	0.00
31	1.50000	D	Combination	0.00
31	2.00000	D	Combination	0.00
32	0.00000	D	Combination	0.00
32	0.50000	D	Combination	0.00
32	1.00000	D	Combination	0.00
32	1.50000	D	Combination	0.00
32	2.00000	D	Combination	0.00

Table: Joint Coordinates, Part 1 of 2

Table: Joint Coordinates, Part 1 of 2

Joint	CoordSys	CoordType	XorR m	Y m	Z m	SpecialJt	GlobalX m
1	GLOBAL	Cartesian	0.00000	0.00000	0.50000	No	0.00000
2	GLOBAL	Cartesian	2.00000	0.00000	0.50000	No	2.00000
3	GLOBAL	Cartesian	4.00000	0.00000	0.50000	No	4.00000
4	GLOBAL	Cartesian	0.00000	2.00000	0.50000	No	0.00000
5	GLOBAL	Cartesian	2.00000	2.00000	0.50000	No	2.00000
6	GLOBAL	Cartesian	4.00000	2.00000	0.50000	No	4.00000
7	GLOBAL	Cartesian	0.00000	4.00000	0.50000	No	0.00000
8	GLOBAL	Cartesian	2.00000	4.00000	0.50000	No	2.00000
9	GLOBAL	Cartesian	4.00000	4.00000	0.50000	No	4.00000
10	GLOBAL	Cartesian	1.00000	1.00000	0.00000	No	1.00000
11	GLOBAL	Cartesian	3.00000	1.00000	0.00000	No	3.00000
12	GLOBAL	Cartesian	1.00000	3.00000	0.00000	No	1.00000
13	GLOBAL	Cartesian	3.00000	3.00000	0.00000	No	3.00000

Table: Joint Coordinates, Part 2 of 2

Table: Joint Coordinates, Part 2 of 2

Joint	GlobalY m	GlobalZ m	GUID
1	0.00000	0.50000	
2	0.00000	0.50000	
3	0.00000	0.50000	
4	2.00000	0.50000	
5	2.00000	0.50000	
6	2.00000	0.50000	
7	4.00000	0.50000	
8	4.00000	0.50000	
9	4.00000	0.50000	
10	1.00000	0.00000	
11	1.00000	0.00000	
12	3.00000	0.00000	
13	3.00000	0.00000	

Table: Joint Loads - Force

Table: Joint Loads - Force

Joint	LoadPat	CoordSys	F1 Kgf	F2 Kgf	F3 Kgf
1	DEAD	GLOBAL	0.00	0.00	-180.00
2	DEAD	GLOBAL	0.00	0.00	-360.00
3	DEAD	GLOBAL	0.00	0.00	-180.00
4	DEAD	GLOBAL	0.00	0.00	-360.00
5	DEAD	GLOBAL	0.00	0.00	-720.00
6	DEAD	GLOBAL	0.00	0.00	-360.00
7	DEAD	GLOBAL	0.00	0.00	-180.00
8	DEAD	GLOBAL	0.00	0.00	-360.00
9	DEAD	GLOBAL	0.00	0.00	-180.00

مقایسه نیروهای بدست آمده از برنامه sap با خروجی برنامه نوشته شده به زبان ویژوال بیسیک

مطابقت دارد و دلیل اختلاف کوچک عدم منظور شدن وزن المان در برنامه نوشته شده است.

3-6 بهینه‌یابی سازه‌فضاکار 8*8

صحت‌سنجی برنامه نوشته شده جهت بهینه‌یابی سازه‌های فضاکار تخت دو لایه و بررسی نحوه عملکرد اصلاح ژنتیکی (روش پیشنهادی) مثال بیان شده در مرجع [41] ارزیابی شده است. مشخصات مساله به قرار زیر می‌باشد:

✓ مدول الاستیسیته $E = 2038902$ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

✓ تنش جاری شدن مصالح $F_y = 2400$ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

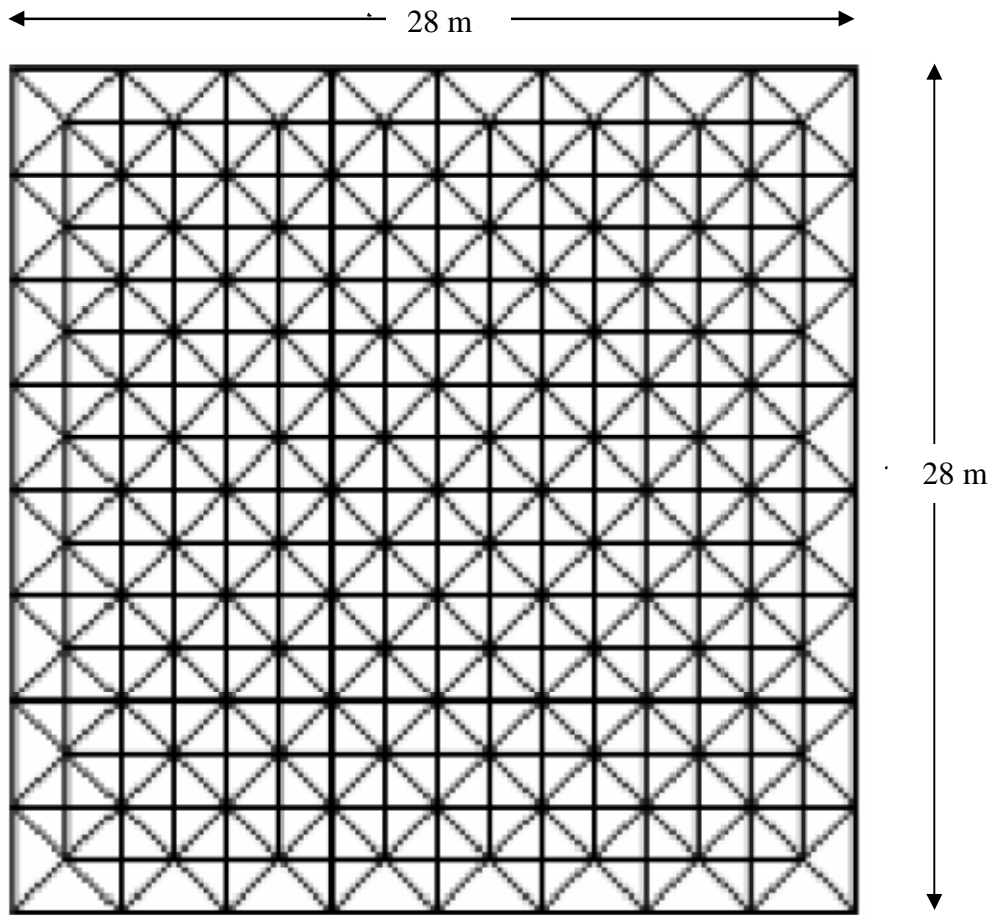
✓ وزن واحد حجم $W = 7850$ کیلوگرم بر متر مکعب

✓ بار مرده سقف $DL = 180$ کیلوگرم بر متر مربع

✓ تکیه‌گاه‌ها در تمامی گره‌های پیرامونی لایه پایین قرار دارند .

✓ تنش مجاز فشاری و کششی مطابق آئین‌نامه ایران می‌باشد.

✓ خیز مجاز $D_m = \frac{L}{360}$



شکل (2-6) سازه فضاکار تخت دو لایه 8×8

در این تحلیل کد نویسی هندسی به گونه‌ای نوشته شده است که سازه از نظر هندسی در دو راستا متقارن باشد. از آنجایی که تکیه‌گاه‌ها نیز متقارن هستند. بنابراین تقارن موجود ذاتا در امر بهینه‌سازی موثر است.

مشخصات جزایر و پارامترهای ژنتیک به کار گرفته در این مثال مطابق جداول (1-5) تا (5-5) می‌باشد.

مشخصات سازه بهینه مشتمل بر مختصات بهینه گرهی (هندسه بهینه) و سطح مقطع بهینه اعضاء در جداول (7-6) و (8-6) نشان داده شده است.

جدول (7-6) مختصات نقاط گرهی

شماره گره	X	Y	Z	شماره گره	X	Y	Z
joint 1	x= 0	y= 0	z= 119	joint 35	x= 2308	y= 1214	z= 119
joint 2	x= 270	y= 0	z= 119	joint 36	x= 2800	y= 1034	z= 119
joint 3	x= 548	y= 0	z= 119	joint 37	x= 0	y= 1400	z= 119
joint 4	x= 1034	y= 0	z= 119	joint 38	x= 473	y= 1400	z= 119
joint 5	x= 1400	y= 0	z= 119	joint 39	x= 711	y= 1400	z= 119
joint 6	x= 1766	y= 0	z= 119	joint 40	x= 943	y= 1400	z= 119
joint 7	x= 2252	y= 0	z= 119	joint 41	x= 1400	y= 1400	z= 119
joint 8	x= 2530	y= 0	z= 119	joint 42	x= 1857	y= 1400	z= 119
joint 9	x= 2800	y= 0	z= 119	joint 43	x= 2089	y= 1400	z= 119
joint 10	x= 0	y= 455	z= 119	joint 44	x= 2327	y= 1400	z= 119
joint 11	x= 484	y= 237	z= 119	joint 45	x= 2800	y= 1400	z= 119
joint 12	x= 550	y= 508	z= 119	joint 46	x= 0	y= 1766	z= 119
joint 13	x= 925	y= 456	z= 119	joint 47	x= 492	y= 1586	z= 119
joint 14	x= 1400	y= 257	z= 119	joint 48	x= 828	y= 1817	z= 119
joint 15	x= 1875	y= 456	z= 119	joint 49	x= 1099	y= 1645	z= 119
joint 16	x= 2250	y= 508	z= 119	joint 50	x= 1400	y= 1792	z= 119
joint 17	x= 2316	y= 237	z= 119	joint 51	x= 1701	y= 1645	z= 119
joint 18	x= 2800	y= 455	z= 119	joint 52	x= 1972	y= 1817	z= 119
joint 19	x= 0	y= 602	z= 119	joint 53	x= 2308	y= 1586	z= 119
joint 20	x= 265	y= 693	z= 119	joint 54	x= 2800	y= 1766	z= 119
joint 21	x= 799	y= 662	z= 119	joint 55	x= 0	y= 2198	z= 119
joint 22	x= 1048	y= 782	z= 119	joint 56	x= 265	y= 2107	z= 119
joint 23	x= 1400	y= 614	z= 119	joint 57	x= 799	y= 2138	z= 119
joint 24	x= 1752	y= 782	z= 119	joint 58	x= 1048	y= 2018	z= 119
joint 25	x= 2001	y= 662	z= 119	joint 59	x= 1400	y= 2186	z= 119
joint 26	x= 2535	y= 693	z= 119	joint 60	x= 1752	y= 2018	z= 119
joint 27	x= 2800	y= 602	z= 119	joint 61	x= 2001	y= 2138	z= 119
joint 28	x= 0	y= 1034	z= 119	joint 62	x= 2535	y= 2107	z= 119
joint 29	x= 492	y= 1214	z= 119	joint 63	x= 2800	y= 2198	z= 119
joint 30	x= 828	y= 983	z= 119	joint 64	x= 0	y= 2345	z= 119
joint 31	x= 1099	y= 1155	z= 119	joint 65	x= 484	y= 2563	z= 119
joint 32	x= 1400	y= 1008	z= 119	joint 66	x= 550	y= 2292	z= 119
joint 33	x= 1701	y= 1155	z= 119	joint 67	x= 925	y= 2344	z= 119
joint 34	x= 1972	y= 983	z= 119	joint 68	x= 1400	y= 2543	z= 119

ادامه جدول (7-6) مختصات نقاط گرهی

شماره گره	x	Y	Z	joint 107	x= 437	y= 1143	z= 0
joint 69	x= 1875	y= 2344	z= 119	joint 108	x= 743	y= 1271	z= 0
joint 70	x= 2250	y= 2292	z= 119	joint 109	x= 1291	y= 1375	z= 0
joint 71	x= 2316	y= 2563	z= 119	joint 110	x= 1509	y= 1375	z= 0
joint 72	x= 2800	y= 2345	z= 119	joint 111	x= 2057	y= 1271	z= 0
joint 73	x= 0	y= 2800	z= 119	joint 112	x= 2363	y= 1143	z= 0
joint 74	x= 270	y= 2800	z= 119	joint 113	x= 2462	y= 1266	z= 0
joint 75	x= 548	y= 2800	z= 119	joint 114	x= 338	y= 1534	z= 0
joint 76	x= 1034	y= 2800	z= 119	joint 115	x= 437	y= 1657	z= 0
joint 77	x= 1400	y= 2800	z= 119	joint 116	x= 743	y= 1529	z= 0
joint 78	x= 1766	y= 2800	z= 119	joint 117	x= 1291	y= 1425	z= 0
joint 79	x= 2252	y= 2800	z= 119	joint 118	x= 1509	y= 1425	z= 0
joint 80	x= 2530	y= 2800	z= 119	joint 119	x= 2057	y= 1529	z= 0
joint 81	x= 2800	y= 2800	z= 119	joint 120	x= 2363	y= 1657	z= 0
joint 82	x= 335	y= 196	z= 0	joint 121	x= 2462	y= 1534	z= 0
joint 83	x= 370	y= 228	z= 0	joint 122	x= 188	y= 1846	z= 0
joint 84	x= 781	y= 336	z= 0	joint 123	x= 634	y= 1863	z= 0
joint 85	x= 1326	y= 318	z= 0	joint 124	x= 910	y= 1855	z= 0
joint 86	x= 1474	y= 318	z= 0	joint 125	x= 1214	y= 1819	z= 0
joint 87	x= 2019	y= 336	z= 0	joint 126	x= 1586	y= 1819	z= 0
joint 88	x= 2430	y= 228	z= 0	joint 127	x= 1890	y= 1855	z= 0
joint 89	x= 2465	y= 196	z= 0	joint 128	x= 2166	y= 1863	z= 0
joint 90	x= 159	y= 429	z= 0	joint 129	x= 2612	y= 1846	z= 0
joint 91	x= 411	y= 522	z= 0	joint 130	x= 159	y= 2371	z= 0
joint 92	x= 847	y= 436	z= 0	joint 131	x= 411	y= 2278	z= 0
joint 93	x= 1172	y= 439	z= 0	joint 132	x= 847	y= 2364	z= 0
joint 94	x= 1628	y= 439	z= 0	joint 133	x= 1172	y= 2361	z= 0
joint 95	x= 1953	y= 436	z= 0	joint 134	x= 1628	y= 2361	z= 0
joint 96	x= 2389	y= 522	z= 0	joint 135	x= 1953	y= 2364	z= 0
joint 97	x= 2641	y= 429	z= 0	joint 136	x= 2389	y= 2278	z= 0
joint 98	x= 188	y= 954	z= 0	joint 137	x= 2641	y= 2371	z= 0
joint 99	x= 634	y= 937	z= 0	joint 138	x= 335	y= 2604	z= 0
joint 100	x= 910	y= 945	z= 0	joint 139	x= 370	y= 2572	z= 0
joint 101	x= 1214	y= 981	z= 0	joint 140	x= 781	y= 2464	z= 0
joint 102	x= 1586	y= 981	z= 0	joint 141	x= 1326	y= 2482	z= 0
joint 103	x= 1890	y= 945	z= 0	joint 142	x= 1474	y= 2482	z= 0
joint 104	x= 2166	y= 937	z= 0	joint 143	x= 2019	y= 2464	z= 0
joint 105	x= 2612	y= 954	z= 0	joint 144	x= 2430	y= 2572	z= 0
joint 106	x= 338	y= 1266	z= 0	joint 145	x= 2465	y= 2604	z= 0
joint 107	x= 437	y= 1143	z= 0				

جدول (8-6) مشخصات المانها

شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع
1	1	2	2.54	36	40	41	17.2	71	79	80	3.73
2	2	3	3.73	37	41	42	17.2	72	80	81	2.54
3	3	4	5.74	38	42	43	18.9	73	1	10	3.73
4	4	5	8.69	39	43	44	7.07	74	2	11	3.25
5	5	6	8.69	40	44	45	5.74	75	3	12	5.74
6	6	7	5.74	41	46	47	5.74	76	4	13	7.07
7	7	8	3.73	42	47	48	7.33	77	5	14	2.54
8	8	9	2.54	43	48	49	11.2	78	6	15	7.07
9	10	11	5.74	44	49	50	26.7	79	7	16	5.74
10	11	12	2.54	45	50	51	26.7	80	8	17	3.25
11	12	13	4.53	46	51	52	11.2	81	9	18	3.73
12	13	14	5.74	47	52	53	7.33	82	10	19	2.54
13	14	15	5.74	48	53	54	5.74	83	11	20	8.62
14	15	16	4.53	49	55	56	2.54	84	12	21	2.54
15	16	17	2.54	50	56	57	8.62	85	13	22	5.74
16	17	18	5.74	51	57	58	2.54	86	14	23	5.74
17	19	20	2.54	52	58	59	7.33	87	15	24	5.74
18	20	21	8.62	53	59	60	7.33	88	16	25	2.54
19	21	22	2.54	54	60	61	2.54	89	17	26	8.62
20	22	23	7.33	55	61	62	8.62	90	18	27	2.54
21	23	24	7.33	56	62	63	2.54	91	19	28	3.73
22	24	25	2.54	57	64	65	5.74	92	20	29	8.62
23	25	26	8.62	58	65	66	2.54	93	21	30	8.62
24	26	27	2.54	59	66	67	4.53	94	22	31	12.3
25	28	29	5.74	60	67	68	5.74	95	23	32	17.2
26	29	30	7.33	61	68	69	5.74	96	24	33	12.3
27	30	31	11.2	62	69	70	4.53	97	25	34	8.62
28	31	32	26.7	63	70	71	2.54	98	26	35	8.62
29	32	33	26.7	64	71	72	5.74	99	27	36	3.73
30	33	34	11.2	65	73	74	2.54	100	28	37	3.25
31	34	35	7.33	66	74	75	3.73	101	29	38	2.54
32	35	36	5.74	67	75	76	5.74	102	30	39	9.06
33	37	38	5.74	68	76	77	8.69	103	31	40	26.7
34	38	39	7.07	69	77	78	8.69	104	32	41	8.69
35	39	40	18.9	70	78	79	5.74	105	33	42	26.7

ادامه جدول (8-6) مشخصات المانها

شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع
106	34	43	9.06	141	69	78	7.07	176	117	118	5.74
107	35	44	2.54	142	70	79	5.74	177	118	119	5.74
108	36	45	3.25	143	71	80	3.25	178	119	120	7.07
109	37	46	3.25	144	72	81	3.73	179	120	121	9.06
110	38	47	2.54	145	82	83	5.57	180	122	123	13.2
111	39	48	9.06	146	83	84	3.73	181	123	124	3.73
112	40	49	26.7	147	84	85	5.74	182	124	125	2.54
113	41	50	8.69	148	85	86	3.25	183	125	126	3.25
114	42	51	26.7	149	86	87	5.74	184	126	127	2.54
115	43	52	9.06	150	87	88	3.73	185	127	128	3.73
116	44	53	2.54	151	88	89	5.57	186	128	129	13.2
117	45	54	3.25	152	90	91	5.57	187	130	131	5.57
118	46	55	3.73	153	91	92	3.73	188	131	132	3.73
119	47	56	8.62	154	92	93	9.06	189	132	133	9.06
120	48	57	8.62	155	93	94	5.74	190	133	134	5.74
121	49	58	12.3	156	94	95	9.06	191	134	135	9.06
122	50	59	17.2	157	95	96	3.73	192	135	136	3.73
123	51	60	12.3	158	96	97	5.57	193	136	137	5.57
124	52	61	8.62	159	98	99	13.2	194	138	139	5.57
125	53	62	8.62	160	99	100	3.73	195	139	140	3.73
126	54	63	3.73	161	100	101	2.54	196	140	141	5.74
127	55	64	2.54	162	101	102	3.25	197	141	142	3.25
128	56	65	8.62	163	102	103	2.54	198	142	143	5.74
129	57	66	2.54	164	103	104	3.73	199	143	144	3.73
130	58	67	5.74	165	104	105	13.2	200	144	145	5.57
131	59	68	5.74	166	106	107	9.06	201	82	90	2.54
132	60	69	5.74	167	107	108	7.07	202	83	91	3.73
133	61	70	2.54	168	108	109	5.74	203	84	92	13.2
134	62	71	8.62	169	109	110	5.74	204	85	93	13.2
135	63	72	2.54	170	110	111	5.74	205	86	94	13.2
136	64	73	3.73	171	111	112	7.07	206	87	95	13.2
137	65	74	3.25	172	112	113	9.06	207	88	96	3.73
138	66	75	5.74	173	114	115	9.06	208	89	97	2.54
139	67	76	7.07	174	115	116	7.07	209	90	98	5.74
140	68	77	2.54	175	116	117	5.74	210	91	99	7.07

ادامه جدول (8-6) مشخصات المانها

شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع
211	92	100	8.62	246	127	135	8.62	281	7	88	7.07
212	93	101	5.74	247	128	136	7.07	282	8	88	3.73
213	94	102	5.74	248	129	137	5.74	283	16	88	5.74
214	95	103	8.62	249	130	138	2.54	284	17	88	3.94
215	96	104	7.07	250	131	139	3.73	285	8	89	4.83
216	97	105	5.74	251	132	140	13.2	286	9	89	7.33
217	98	106	3.25	252	133	141	13.2	287	17	89	2.54
218	99	107	3.73	253	134	142	13.2	288	18	89	7.33
219	100	108	3.25	254	135	143	13.2	289	10	90	3.25
220	101	109	3.25	255	136	144	3.73	290	11	90	3.25
221	102	110	3.25	256	137	145	2.54	291	19	90	4.53
222	103	111	3.25	257	1	82	7.33	292	20	90	8.69
223	104	112	3.73	258	2	82	4.83	293	11	91	2.54
224	105	113	3.25	259	10	82	7.33	294	12	91	2.54
225	106	114	3.94	260	11	82	2.54	295	20	91	3.25
226	107	115	5.74	261	2	83	3.73	296	21	91	7.33
227	108	116	2.54	262	3	83	7.07	297	12	92	3.25
228	109	117	3.73	263	11	83	3.94	298	13	92	3.73
229	110	118	3.73	264	12	83	5.74	299	21	92	7.33
230	111	119	2.54	265	3	84	7.33	300	22	92	15.6
231	112	120	5.74	266	4	84	8.62	301	13	93	2.54
232	113	121	3.94	267	12	84	11.2	302	14	93	7.07
233	114	122	3.25	268	13	84	11.2	303	22	93	5.74
234	115	123	3.73	269	4	85	7.33	304	23	93	9.06
235	116	124	3.25	270	5	85	5.74	305	14	94	7.07
236	117	125	3.25	271	13	85	13.2	306	15	94	2.54
237	118	126	3.25	272	14	85	5.74	307	23	94	9.06
238	119	127	3.25	273	5	86	5.74	308	24	94	5.74
239	120	128	3.73	274	6	86	7.33	309	15	95	3.73
240	121	129	3.25	275	14	86	5.74	310	16	95	3.25
241	122	130	5.74	276	15	86	13.2	311	24	95	15.6
242	123	131	7.07	277	6	87	8.62	312	25	95	7.33
243	124	132	8.62	278	7	87	7.33	313	16	96	2.54
244	125	133	5.74	279	15	87	11.2	314	17	96	2.54
245	126	134	5.74	280	16	87	11.2	315	25	96	7.33

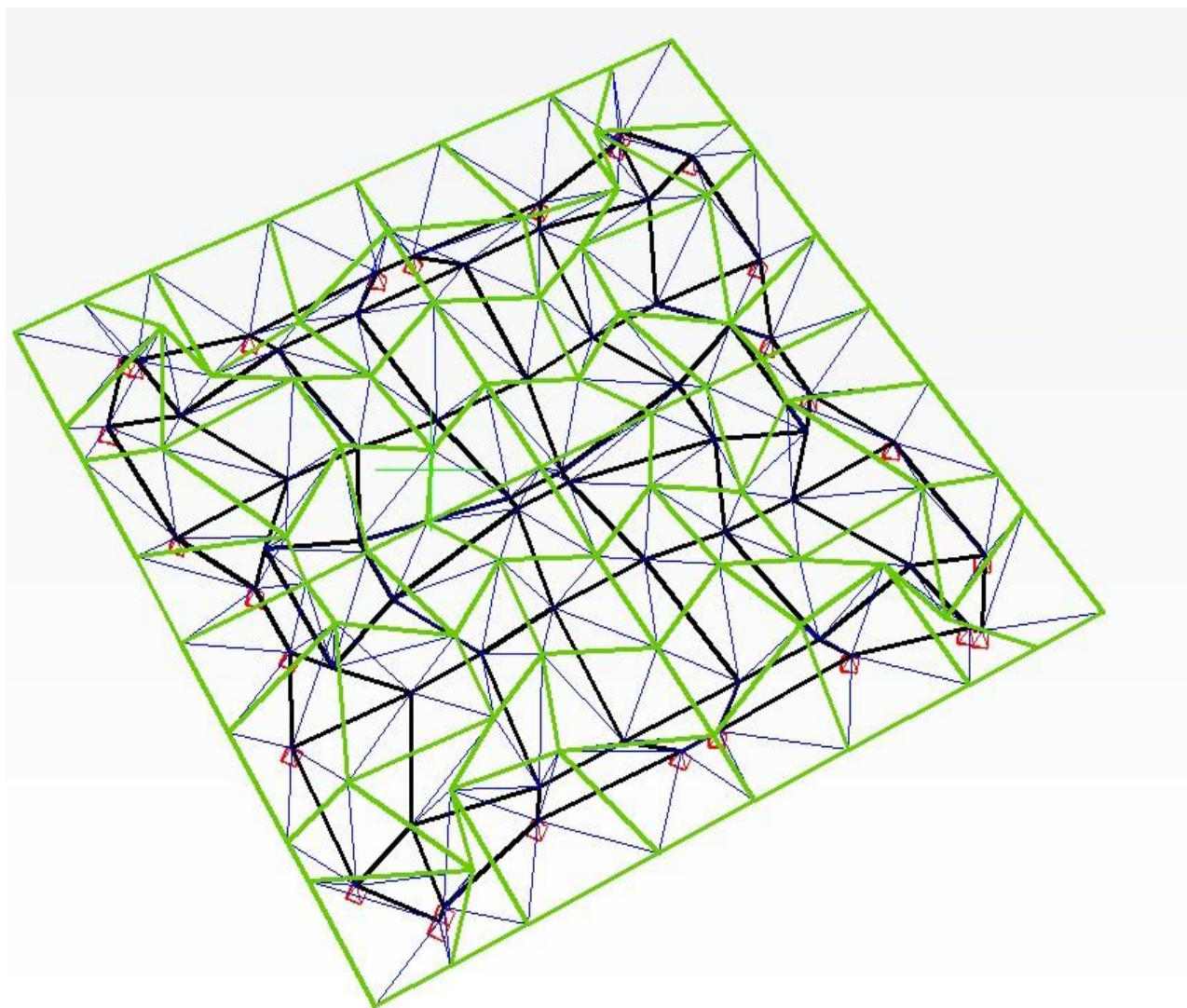
ادامه جدول (8-6) مشخصات المانها

شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع
316	26	96	3.25	351	35	105	3.73	386	38	114	8.69
317	17	97	3.25	352	36	105	4.53	387	46	114	9.06
318	18	97	3.25	353	28	106	9.06	388	47	114	9.06
319	26	97	8.69	354	29	106	9.06	389	38	115	4.83
320	27	97	4.53	355	37	106	8.69	390	39	115	15.2
321	19	98	7.33	356	38	106	8.69	391	47	115	2.54
322	20	98	9.06	357	29	107	2.54	392	48	115	7.33
323	28	98	4.53	358	30	107	7.33	393	39	116	3.07
324	29	98	3.73	359	38	107	4.83	394	40	116	7.33
325	20	99	3.73	360	39	107	15.2	395	48	116	3.25
326	21	99	5.74	361	30	108	3.25	396	49	116	7.33
327	29	99	3.25	362	31	108	7.33	397	40	117	3.94
328	30	99	4.53	363	39	108	3.07	398	41	117	2.54
329	21	100	4.83	364	40	108	7.33	399	49	117	7.33
330	22	100	3.73	365	31	109	7.33	400	50	117	3.25
331	30	100	2.54	366	32	109	3.25	401	41	118	2.54
332	31	100	4.53	367	40	109	3.94	402	42	118	3.94
333	22	101	3.07	368	41	109	2.54	403	50	118	3.25
334	23	101	3.73	369	32	110	3.25	404	51	118	7.33
335	31	101	3.25	370	33	110	7.33	405	42	119	7.33
336	32	101	5.74	371	41	110	2.54	406	43	119	3.07
337	23	102	3.73	372	42	110	3.94	407	51	119	7.33
338	24	102	3.07	373	33	111	7.33	408	52	119	3.25
339	32	102	5.74	374	34	111	3.25	409	43	120	15.2
340	33	102	3.25	375	42	111	7.33	410	44	120	4.83
341	24	103	3.73	376	43	111	3.07	411	52	120	7.33
342	25	103	4.83	377	34	112	7.33	412	53	120	2.54
343	33	103	4.53	378	35	112	2.54	413	44	121	8.69
344	34	103	2.54	379	43	112	15.2	414	45	121	8.69
345	25	104	5.74	380	44	112	4.83	415	53	121	9.06
346	26	104	3.73	381	35	113	9.06	416	54	121	9.06
347	34	104	4.53	382	36	113	9.06	417	46	122	4.53
348	35	104	3.25	383	44	113	8.69	418	47	122	3.73
349	26	105	9.06	384	45	113	8.69	419	55	122	7.33
350	27	105	7.33	385	37	114	8.69	420	56	122	9.06

ادامه جدول (8-6) مشخصات المان‌ها

شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع	شماره المان	گره ابتدا	گره انتها	سطح مقطع
421	47	123	3.25	456	66	131	2.54	491	75	140	7.33
422	48	123	4.53	457	57	132	7.33	492	76	140	8.62
423	56	123	3.73	458	58	132	15.6	493	67	141	13.2
424	57	123	5.74	459	66	132	3.25	494	68	141	5.74
425	48	124	2.54	460	67	132	3.73	495	76	141	7.33
426	49	124	4.53	461	58	133	5.74	496	77	141	5.74
427	57	124	4.83	462	59	133	9.06	497	68	142	5.74
428	58	124	3.73	463	67	133	2.54	498	69	142	13.2
429	49	125	3.25	464	68	133	7.07	499	77	142	5.74
430	50	125	5.74	465	59	134	9.06	500	78	142	7.33
431	58	125	3.07	466	60	134	5.74	501	69	143	11.2
432	59	125	3.73	467	68	134	7.07	502	70	143	11.2
433	50	126	5.74	468	69	134	2.54	503	78	143	8.62
434	51	126	3.25	469	60	135	15.6	504	79	143	7.33
435	59	126	3.73	470	61	135	7.33	505	70	144	5.74
436	60	126	3.07	471	69	135	3.73	506	71	144	3.94
437	51	127	4.53	472	70	135	3.25	507	79	144	7.07
438	52	127	2.54	473	61	136	7.33	508	80	144	3.73
439	60	127	3.73	474	62	136	3.25	509	71	145	2.54
440	61	127	4.83	475	70	136	2.54	510	72	145	7.33
441	52	128	4.53	476	71	136	2.54	511	80	145	4.83
442	53	128	3.25	477	62	137	8.69	512	81	145	7.33
443	61	128	5.74	478	63	137	4.53				
444	62	128	3.73	479	71	137	3.25				
445	53	129	3.73	480	72	137	3.25				
446	54	129	4.53	481	64	138	7.33				
447	62	129	9.06	482	65	138	2.54				
448	63	129	7.33	483	73	138	7.33				
449	55	130	4.53	484	74	138	4.83				
450	56	130	8.69	485	65	139	3.94				
451	64	130	3.25	486	66	139	5.74				
452	65	130	3.25	487	74	139	3.73				
453	56	131	3.25	488	75	139	7.07				
454	57	131	7.33	489	66	140	11.2				
455	65	131	2.54	490	67	140	11.2				

در شکل (3-6) نمای سه بعدی سازه بهینه نشان داده شده است. نتایج طرح بهینه حاصل، توسط نرم افزار sap2000 تحلیل و هیچ گونه نقض قیدی مشاهده نمی گردد. فایل مربوطه در CD ضمیمه ارائه شده است.



شکل (3-6) تصویر سازه فضاکار بهینه

مساله حاضر با فرمول بندی متفاوت حل شده است. اولین حالتی که ارائه می شود حل مساله مورد نظر فقط توسط روش جستجوی چند منظوره می باشد. این روش تا نسل 5000 اجرا گردید اما از آنجایی که از نسل 800 به بعد هیچ تفاوتی در جزایر ایجاد نشد تا نسل 800 ترسیم شده است.



شکل (4-6) نمودار خروجی برنامه به روش MSA

قابل ذکر است که زمان اجرای برنامه 5563 دقیقه می باشد در حالی که هنوز سازه بهینه نشده و مقدار تابع نقض قید صفر نشده است. بهترین نتیجه برای تابع هدف اصلاح شده 892480 کیلوگرم می باشد.

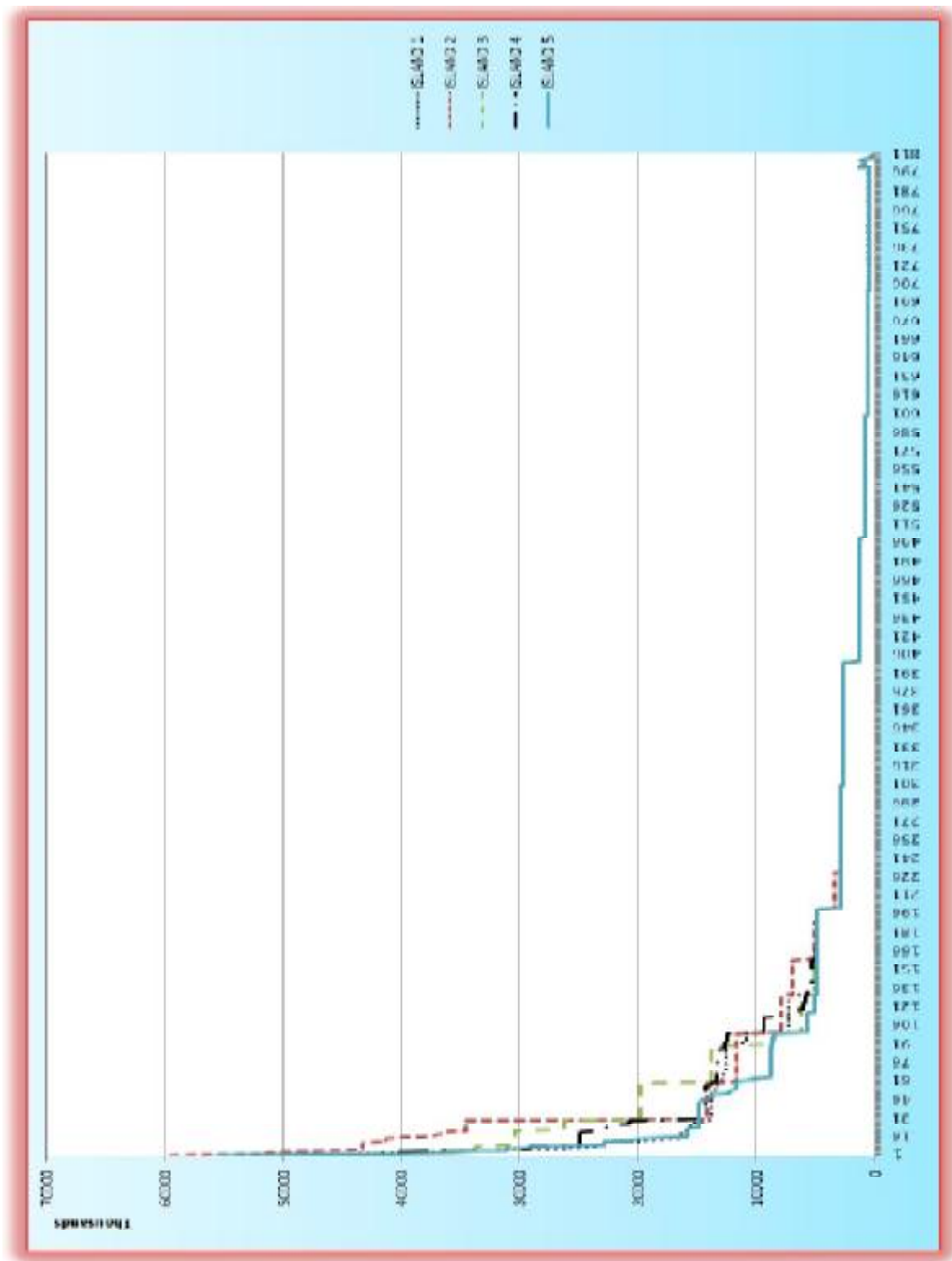
همانطور که در شکل (4-6) دیده می شود جزایر 2 و 3 عملکرد خوبی نداشته در حالی که عملکرد جزایر 4 و 5 خوب و عملکرد جزیره 1 بسیار خوب می باشد. می توان از این نتیجه گیری استفاده کرد و تعداد افراد نسل ها در جزایری که بهتر کار می کنند را افزایش داد.

در ضمن در برنامه نوشته شده این قابلیت وجود دارد که روش های جزایر را به دلخواه تعیین نمود. لذا می توان روش های برتر جزیره 1 را در سایر جزایر استفاده نمود.

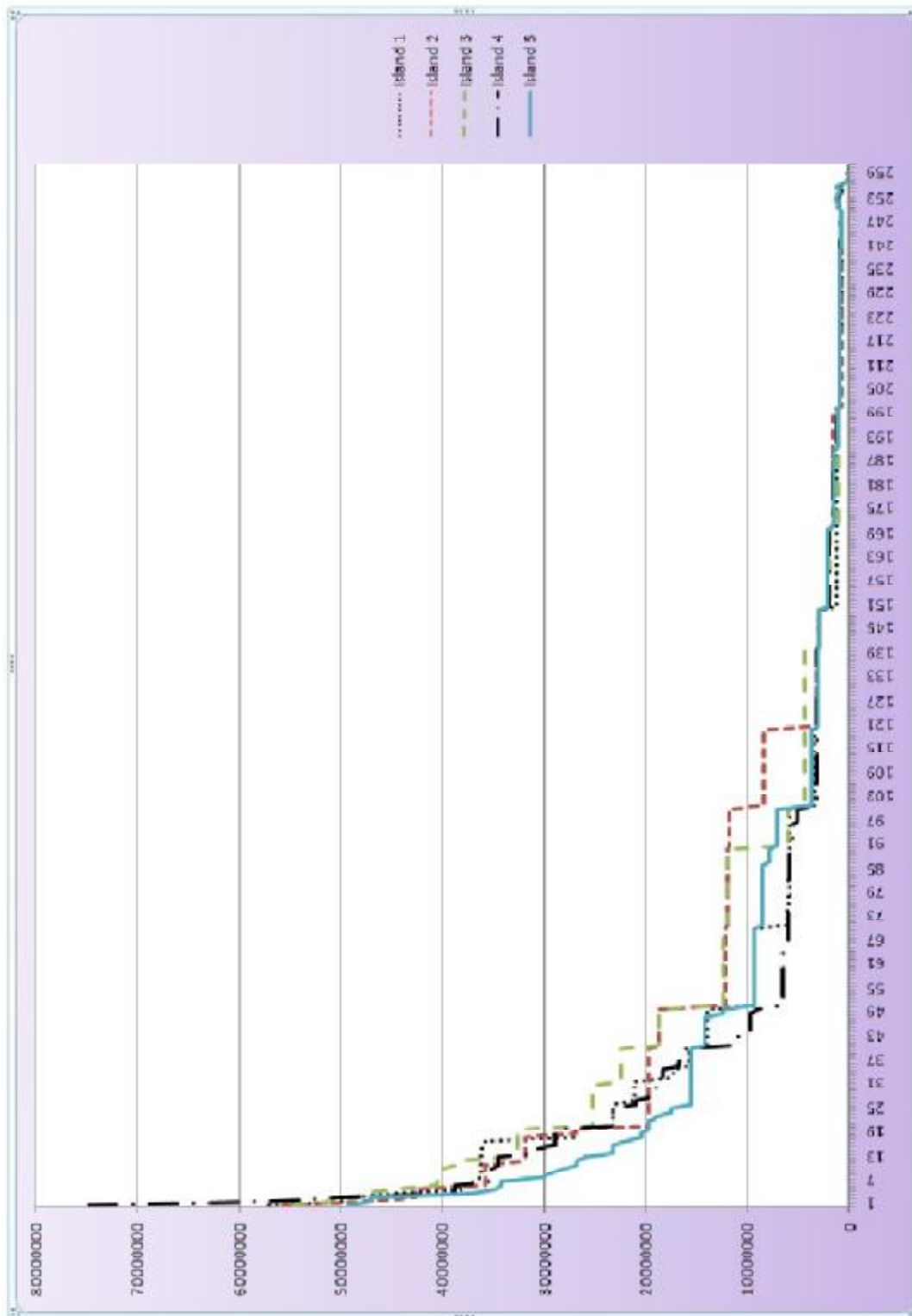
دومین روشی که بررسی شده است حل مساله مورد نظر توسط روش جستجوی چند منظوره با کمک روش اصلاح ژنتیکی است. در این روش چگونگی روش اصلاح ژنتیکی و به ازای هر چند نسل این برنامه اجرا شود، اهمیت بسیاری دارد. این روش خود به دو حالت تقسیم می شود. حالت اول به ازای هر 100 نسل برنامه اصلاح ژنتیک اجرا شده است. و در حالت بعدی به ازای هر 50 نسل، که نمودارهای مربوطه در اشکال (5-6) و (6-6) نشان داده شده است.

در حالت 100 تایی برنامه در نسل 813 به سازه بهینه دست پیدا کرده است. زمان اجرای برنامه 890 دقیقه می باشد و مقدار تابع هدف اصلاح شده در آن 8854 کیلوگرم می باشد. در حالت 50 تایی برنامه در نسل 261 به سازه بهینه دست پیدا کرده است. زمان اجرای برنامه 289 دقیقه می باشد و مقدار تابع هدف اصلاح شده 11446 کیلوگرم می باشد.

ملاحظه می شود که با کم شدن تعداد نسل سازی ها برای اعمال فرایند اصلاح ژنتیکی، نتایج مطلوب حاصل نشده است. لذا بایستی در مورد تعداد نسل سازی ها دقت مناسب را معطوف داشت.



شکل (5-6) نمودار خروجی برنامه به روش MSM و اصلاح ژنتیک حالت 100 تایی



شکل (6-6) نمودار خروجی برنامه به روش MSM و اصلاح ژنتیک حالت 50 تایی

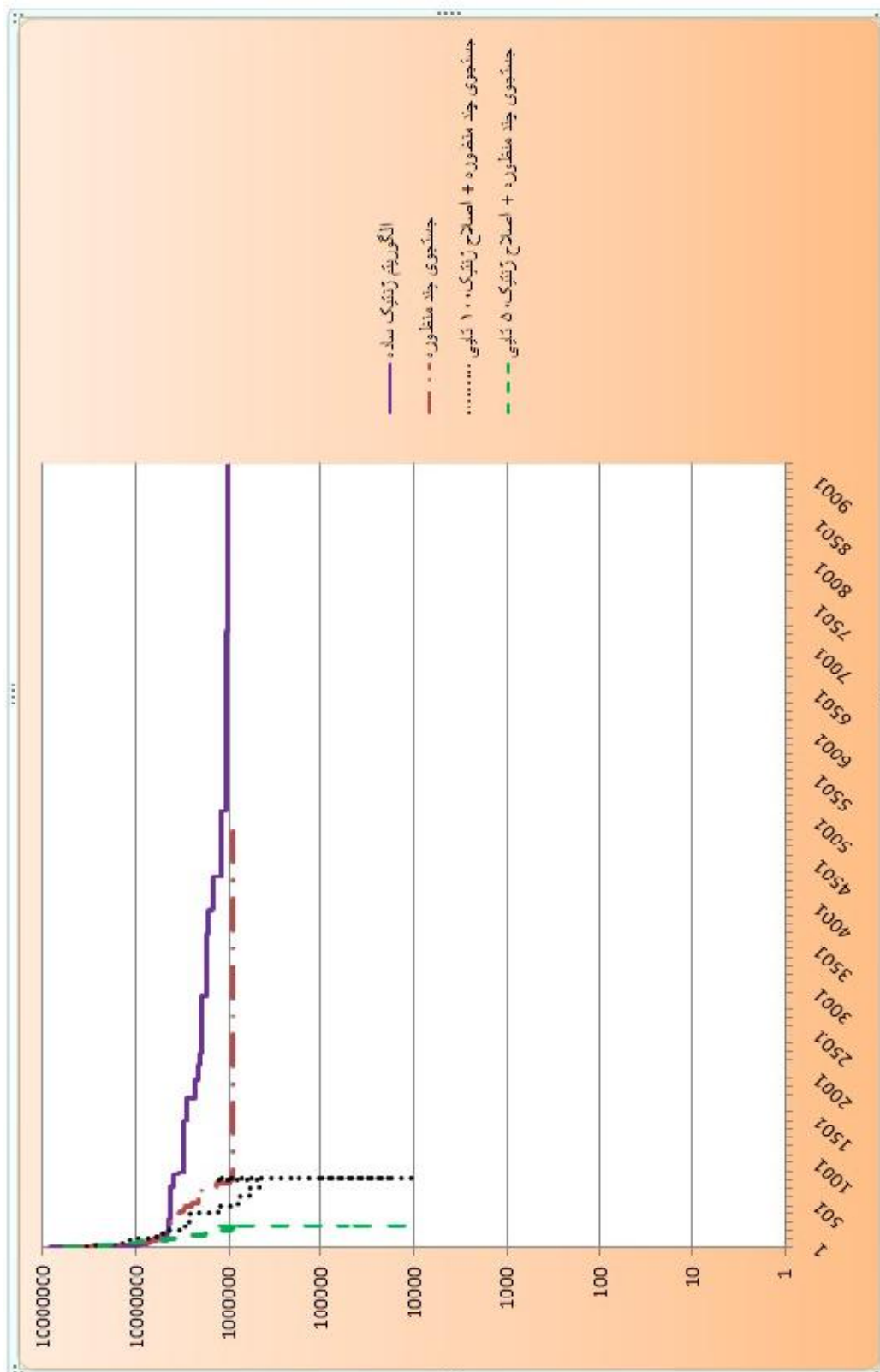
در شکل (7-6) نتایج طرح بهینه سازه فضاکار تخت دو لایه 8×8 به ازای اجرای برنامه توسط

مجموعه روش‌های الگوریتم ژنتیک ساده، الگوریتم ژنتیک جستجوی چند منظوره، جستجوی چند

منظوره به همراه اصلاح ژنتیک 100 تایی و جستجوی چند منظوره به همراه اصلاح ژنتیک 50 تایی نشان داده شده است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود روش M.S.A از روش S.G.A بهتر عمل کرده است و قابل انتظار می‌باشد همچنین ملاحظه می‌شود تلفیق روش اصلاح ژنتیکی با روش M.S.A نتایج بهتری را به دست داده است .

در ضمن اعمال روش اصلاح ژنتیکی به ازای هر 100 نسل نتایج بهتری را نسبت به اعمال آن در هر 50 نسل به دست داده است.



شکل (7-6) نمودار خروجی برنامه مقایسه روش‌ها

قابل ذکر است که با این روش وزن سازه در مقایسه با مرجع [41] 34 درصد کاهش یافته است. بایستی خاطر نشان شود که در مرجع [41] فقط بهینه‌یابی سطح مقطع انجام شده است در حالی که در این پایان‌نامه بهینه‌یابی سطح مقطع و هندسه به طور توأم انجام شده است .

از آنجایی که مهندسين معمولاً تحليل و طراحی سازه‌ها توسط نرم‌افزارهای مربوطه را به نحوی انجام می‌دهند که انتخاب سطح مقطع توسط نرم‌افزار و معمولاً به صورت **Auto Select** صورت می‌پذیرد، همین مثال بر این اساس توسط نرم‌افزار **sap2000** تحلیل و طراحی گردید و نتیجه 11736 کیلوگرم حاصل شد که نسبت به طرح بهینه صورت پذیرفته در این پایان‌نامه 33 درصد بیشتر است.

فصل ہفتم:

میچک مرکزی پیدائش مادات

7-1 مقدمه

در این فصل به بیان خلاصه ای از نتایج و دستاوردهای حاصل از این پایان نامه پرداخته می‌شود. همچنین با ارائه پیشنهاداتی ، راه‌های آتی جهت ادامه پژوهش در این زمینه مطرح می‌گردد. هدف از این پایان نامه ارائه روش اصلاح ژنتیکی جهت بهینه‌یابی سازه‌های فضاکار با استعانت از روش‌های نوین الگوریتم ژنتیک است. در این راستا نتایجی بشرح ذیل حاصل شده است.

2-7 نتایج

نتایج بدست آمده به شرح زیر می باشند:

1. الگوریتم مطروحه با استعانت از شیوه پیشنهادی روش اصلاح ژنتیک، به همراه روش جستجوی چند منظوره در نیل به نقطه کمینه دارای سرعت همگرایی چشمگیری می باشد. بدین سان مشکل سرعت فرآیند بهینه یابی، از طریق الگوریتم های ژنتیک در مسائل بزرگ حدودی حل شده است.

2. با استعانت از شیوه توزیع جزیره ای در الگوریتم ژنتیک ، جواب های الگوریتم مطروحه ، از تنوع خاص برخوردارند. لذا فضای طراحی با طیف بیشتری مورد کاوش قرار می گیرد. به عبارت دیگر به دلیل تفاوتی که در ساختار هر یک از جزایر وجود دارد ، فضای طراحی با شیوه های مختلف ، بطور هوشمندی جستجو می شود. این مسئله سبب می شود تا حتی الامکان الگوریتم در دام بهینه محلی به نیفتد و به سمت بهینه سراسری حرکت نماید

3. در این پایان نامه از روش نخبه گرایی نیز استفاده شده است . بدین ترتیب بهترین کروموزوم در هر نسل برای نسل بعد باقی می ماند و این امر در سرعت دستیابی به سازه بهینه بسیار موثر است.

4. از آن جاکه بهترین کروموزوم های هر جزیره در مرحله مهاجرت به جزایر دیگر فرستاده شده و جایگزین کروموزوم های نا لایق و نا بارور در جزیره مقصد می شوند؛ مفهوم نخبه گرایی بطور غیرمستقیم بر فضای الگوریتم جستجوی چند منظوره سایه افکنده

است. به عبارت دیگر بدین سان بهترین‌های جزایر در روند بهینه‌یابی حفظ می‌شوند ،
تا میزان شایستگی رشدی صعودی داشته باشد.

5. قرارگیری روش‌ها در هر جزیره بر اساس آزمودن همه‌ی روش‌ها و تایید کسب نتیجه
مناسب حاصل شده است.

6. تقسیم‌بندی تعداد نسل‌سازی‌ها و اجرای برنامه در هر مقطع زمانی مورد نظر با استفاده
از نتایج مراحل قبل می‌تواند زمان اجرای برنامه کامپیوتری توسط کاربر را قابل تنظیم
کند.

7. امکان انتخاب روش‌های متنوع در جزایر و ترکیب آن‌ها سبب افزایش قدرت کاربر در
کسب نتیجه بهینه مطلوب گردید.

تمهیدات فوق و دستورالعمل‌های جنبی دیگر که در این پایان‌نامه، مطرح گردید، سبب
می‌شود عملیات بهینه‌یابی توسط GA با سرعت بیشتر و حجم عملیات عددی کمتر دنبال شود و
احتمال حصول بهینه عمومی افزایش یابد.

3-7 پیشنهادات

1. استفاده از روش اصلاح ژنتیکی در بهینه‌یابی دیگر سازه‌های همچون تیروورق ها ، سازه های اسکلتی و سازه‌های خرپایی
2. بهینه‌یابی توپولوژی سازه‌های فضاکار به همراه بهینه‌یابی سطح مقطع و هندسی براساس الگوریتم جستجوی چند منظوره و روش پیشنهادی اصلاح ژنتیک.
3. گسترش مفاهیم اصلاح ژنتیک در پارامترهای هندسی و توپولوژی
4. اعمال نرخ صعودی یا نزولی به وقفه مهاجرت و بررسی تاثیرات آن بر روی نتایج طرح بهینه
5. اعمال نرخ صعودی یا نزولی به وقفه اصلاح ژنتیک و بررسی تاثیرات آن بر روی نتایج طرح بهینه

فهرست مراجع

[1] - هفته آر. تی و گوردال زد. (1382). " مبانی بهینه سازی سازه ها ". ابوالبشری م. ح. چاپ اول ، دانشگاه فردوسی مشهد ، مشهد.

[2] – Christensen, P, W and Klarbring. A(2009) ,” **An Introduction to Structural Optimization**” , springer, pp.5

[3] Khorsand, A, R., Akbarzadeh-T, M, R,(2007)” **Multi-objective meta level soft computing-based evolutionary structural design**” , Journal of the Franklin Institute, pp 595–612

[4] Hassani B. and Hinton E. (1999). “**Homogenization and Structural Topology Optimization**”. Springer.

[5] Hojat Adeli, Kamal C Sarma, (2006), “Cost Optimization of Structures Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, and Parallel Computing”. John Wiley & Sons Ltd, England.

[6] Kaveh A. and Kalatjari V. (2002). “Genetic Algorithm for Discrete-Sizing Optimal Design of Trusses Using the Force Method”, **International Journal of Numerical Methods in Engineering**. 55, pp 55-72.

[7] Haupt R. L. and Haupt E.(2004). “**Practical Genetic Algorithms**”. Second Edition, John Wiley and Sons, New York.

[8] طالبپور. ح، 1387، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بهینه یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه های خرپایی با استفاده از روش های نوین الگوریتم ژنتیک"، دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود

[9] امید باوی، منوچهر صالحی (1387) "الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی سازه های مرکب"، چاپ اول، انتشارات عابد، تهران

[10] علیرضا م. (1386). "مقدمه ای بر الگوریتم های ژنتیک و کاربردهای آن". چاپ دوم ، شرکت ناقوس اندیشه ، تهران.

[11] رضایی ع. و رنجبران س. (1386). "آموزش کاربردی الگوریتم ژنتیک در نرم افزار Matlab". چاپ اول ، کتاب پدیده ، تهران.

[13] کلات جاری و. ر. (1380)، رساله دکتری. "بهینه یابی خرپاها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش جبری نیروها". دانشکده عمران ، دانشگاه علم و صنعت ایران.

[14] نوریان ا. 1388 ، پایان نامه کارشناسی ارشد "بهینه یابی ابعادی قاب های شیب دار غیرمنشوری فولادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک" دانشکده عمران معماری دانشگاه صنعتی شاهرود

[15] Rajan S. D. (1995). "Sizing, Shape, and Topology Optimization of Trusses Genetic Algorithms", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 121, 10, pp, 1480-1487.

[16] Rajeev S. and Krishnamoorthy C. S. (1992). "Discrete Optimization Of Structures Using Genetic Algorithms", *ASCE, Journal of Structural Engineering*. 118, 5, pp. 1233-1250.

[17] Mitchell M. (1999). "**An Introduction to Genetic Algorithms**". MIT Press, ISBN 0-262-13316-4.

[18] Haupt R. L. and Werner D. H. (2007). "**Genetic Algorithms in Electromagnetics**". IEEE PRESS, ISBN 978-0-471-48889-7.

[19] O'Reilly U. M., Yu T., Riolo R. and Worzel B. (2005). "**Genetic Programming Theory and Practice II**". Springer Science + Business Media, Inc. Print ISBN 0-387-23253-2, e-Book ISBN 0-387-232534-0

[20] Yang J. and Soh C. K. (1997). "Structural Optimization by Genetic Algorithms with Tournament Selection". *ASCE, Journal of Computing In Civil Engineering*, 11, 3, pp. 195-200.

- [21] Sahab M. G., Toropov V. V. and Ashour A. F. (2004). “A Hybrid Genetic Algorithm for Structural Optimization Problems”. **Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)**, 5, pp. 121-143.
- [22] Sivanandam S. N. and Deepa S. N. (2008). “**Introduction to Genetic Algorithms**”, Springer-Berlin Heidelberg New York, ISBN 978-3-540-73189-4.
- [23] - Melarago, M(1991). An Introduction to shell structures. The Art and Science of Vaulting Van Nostrand Reinhold
- [24]- Bell,A.G.(1903).The tetrahedral principle in kite structure. National Geographic,14(6), June ,231
- [25] - Walters,R . and Iredale, R.(1964) . The Nenk method of building . RIBA journal , June 259
- [26] – Baldwin, J.(1996). Bucky Works - Buckminster Fuller Ideas for Today. Wiley
- [27] – Wachsman, K. (1961). The Turning Point of Building. Reinhold
- [28] – Du Chateau, S. (1995). Space Structure – structure Space . In lightweight Structures in Civil Engineering (J. B. Obrebski, ed) pp.756-66
- [29] – Makowski, Z.S. (1975). Space Structures of Stephane du Chateau. Building Specification ,6,31-40
- [30] – Fentiman, H. G.(1996). Developments in Canada in the fabrication and construction of three-dimensional structures using the Triodetic system . In Space Structures pp.1073-82
- [31] – Gordon, B. F. (1983). Olympic Architecture : Building for Summer Games. Wiley.
- [32] – Makowski, Z. S.(ed.)(1981). Analysis , Design and Construction of Double Layer Grids. Applied Science Publishers
- [33] – Analysis, design and realization of space frames: a state of the art report. Bulletin of the International Association of shell and Spatial Structures 1984

[34] – Latticed Structures : state of the art report . journal of the structural division, ASCE, 1976 ,102 (ST11)

[35] – Lacopulos, A. J. Space frame for multiple antenna reflecting panels. Proceeding of the international conference on space structures, University of Surrey , Guildford, 1966, pp.1134-1143

[36] – Goldberg D. E. and Samtani M. P.(1986). “Engineering Optimization via Genetic Algorithm”. **ASCE, Proceedings of the Ninth Conference on Electronic Computations**, pp. 471-482.

[37] – Imai K. and Schmith L. A.(1981). “Configuration Optimization Of trusses”. **ASCE, Journal of Structural Division**, 107, pp. 745-756.

[38] مقررات ملی ساختمان مبحث دهم (1389) " طرح و اجرای ساختمان های فولادی ". چاپ چهارم

[39] جعفرنژاد ق. و عباس نژاد ر. (1384). " آموزش گام به گام ویژوال بیسیک ". چاپ هشتم، انتشارات علوم رایانه، تهران.

[40] مهندس بهرام پاشایی. (1387). " ویژوال بیسیک 6 ". چاپ چهاردهم، انتشارات جهان نو.

[41] جواد سلاجقه، مصطفی مشایخی، محسن خطیبی نیا (1387). " بهینه سازی سازه های فضاکار تخت دولایه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل تقریبی موضعی سازه ". دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی، بخش مهندسی عمران



Shahrood University of Technology

Faculty: Civil & Architecture

**Shape And Sizing Optimization of Space Structure by
Genetic Algorithm**

SALEH HAGHPARAST

Supervisor: Dr. VAHID REZA KALATJARI

Advisor: Dr. SYROOS GHOLAMPOUR

February, 2011