National Conference on Architecture, Civil Engineering,
Urban Development and Horizons of Islamic Art
in the Second Step Statement of the Revolution
Tabriz Islamic Art University / 20 May. 2021

بهینه‌سازی اندازه خرپا با استفاده از الگوریتم ترکیبی جستجوی هارمونی

سئودا صف آرائی[1]* دکتر ناصر تقی زادیه[2]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، Sevda.safaraei@yahoo.com

۲- دانشیار و عضو هیئت علمی دانشکده عمران دانشگاه تبریز، ntaghiza@tabrizu.ac.ir

چکیده

امروزه برای کاهش هزینه‌ها و مقاوم سازی پروژه‌های عمرانی از انواع روش‌های بهینه‌سازی رایج در سازه‌ها استفاده می‌شود. از دیگر مزایای بهینه‌سازی سازه‌ها میتوان به بهبود عملکرد سازه در مقابل نیروهای جانبی اشاره نمود، به‌همین دلیل پیشرفت‌های بسیار زیادی در امر بهینه‌سازی سازه‌ها انجام گرفته شده‌است. در طی چندین سال گذشته از روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی جهت بهینه‌سازی استفاده شده‌است، از جمله الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی و جستجوی هارمونی را می‌توان نام برد، که جدیدترین و کارآمدترین آن‌ها الگوریتم جستجوی هارمونی می‌باشد. الگوریتم جستجوی هارمونی با هدف هماهنگی و هارمونی، برای رسیدن به بهترین جواب، از موسیقی الهام گرفته شده‌است. در این تحقیق ۶ خرپا از نوع مسطح و فضایی مورد بررسی قرار گرفته است. خرپاهای مورد بررسی در این تحقیق به ترتیب ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۵۲، ۷۲ و ۲۰۰ عضوی هستند. در بررسی هر کدام از خرپاها، قیود تغییرمکان گره‌ها و تنش در اعضا بعنوان عامل کنترل ناپایداری مدنظر بوده است. در واقع الگوریتم جستجوی هارمونی بهترین راهبرد برای تبدیل روندهای مورد بررسی کیفی به فرآیندهای کمی و قابل لمس بهینه‌سازی است. هدف از این پژوهش کاهش وزن مقاطع سازه‌های خرپایی می‌باشد که در نتیجه وزن کل سازه کاهش‌یافته و در مقابل نیروهای جانبی وارده از جمله زلزله و باد عملکرد بهتری نشان بدهد. با کمی چشم‌پوشی می‌توان گفت حافظه مصرفی در الگوریتم ژنتیک تقریبا دو برابر حافظه مصرفی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی است. الگوریتم جستجوی هارمونی در مواردی می‌تواند همانند الگوریتم ژنتیک عمل نماید و حتی به‌نظر می‌رسد در حل بعضی مسائل بتواند سریع‌تر به پاسخ مسئله همگرا گردد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم فراابتکاری، الگوریتم جستجوی هارمونی، شبکه عصبی

۱- مقدمه

رسیدن به اهداف عملکردی مورد نیاز در هر سازه‌ای، با در نظر گرفتن همزمان کاهش هزینه‌ها معنا پیدا می‌کند. این مفهوم در قالب طراحی مهندسی و به صورت دقیق‌تر در بهینه‌سازی سازه در طراحی گنجانده می‌شود. در ایران با توجه به لرزه‌خیزی بالای اغلب مناطق، به دلیل رفتار متفاوت سیستم‌های سازه‌ای در برابر بارهای جانبی و ثقلی، ارائهٔ طرحی مناسب و مقرون به صرفه برای سازه‌ها اهمیتی دو چندان پیدا خواهدکرد. در واقع اساسِ بهینه‌سازی سازه‌ها در ایران بر مبنای کاهش تاثیر نیروهای زلزله بر سازه می‌باشد. این روند باید به گونه‌ای صورت پذیرد که در عین کاهش مصرف مصالح، هزینه‌ها کاهش یابد و ایمنی سازه دچار خدشه نشود. امروزه با توجه به محدود بودن منابع و تجهیزات در اجرای اغلب پروژه‌های عمرانی، استفاده بهینه از امکانات موجود جهت کاهش هزینه‌ها، امری ضروری می‌باشد.

از دیگر مزایای بهینه‌سازی سازه‌ها می‌توان به بهبود عملکرد سازه در مقابل نیروهای جانبی اشاره نمود، به همین دلیل پیشرفت‌های بسیار زیادی در امر بهینه‌سازی سازه‌ها انجام گرفته شده‌است. در طی چندین سال گذشته از روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی جهت بهینه‌سازی استفاده شده‌است، از جمله الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی و جستجوی هارمونی را می‌توان نام برد، که جدیدترین و کارآمدترین آنها الگوریتم جستجوی هارمونی می‌باشد. این الگوریتم برای اولین بار توسط Z.Geem درسال ۲۰۰۱ به عنوان یک روش بهینه‌سازی معرفی شد [۱]. الگوریتم جستجوی هارمونی با هدف هماهنگی و هارمونی، برای رسیدن به بهترین جواب، از موسیقی الهام گرفته شده‌است. تلاش برای یافتن این هارمونی و هماهنگی در موسیقی، مثل پیداکردن شرایط بهینه در فرآیند بهینه‌سازی می‌باشد. در واقع الگوریتم جستجوی هارمونی بهترین راهبرد برای تبدیل روندهای مورد بررسی کیفی به فرآیندهای کمی و قابل لمس بهینه‌سازی است. روندی به همراه بعضی از قوانین ایده‌آل که نتیجه آن تبدیل قطعه‌های زیبا از موسیقی به یک راه حل مناسب برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی خواهد بود. در این تحقیق وزن کل سازه تناسب مستقیم با نیروی زلزله دارد. بهینه‌سازی سازه جهت کاهش وزن آن امری مهم محسوب می‌گردد. با بهینه‌سازی وزن اعضای یک سازه می‌توان آن را سبک نمود.

در مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی دو معیار همگرایی و عملکرد مطرح می‌شود. بعضی از الگوریتم‌ها دارای همگرایی بوده ولی ممکن است عملکرد ضعیفی داشته باشند، یعنی فرایند بهبود آنها از کارایی و سرعت لازم برخوردار نباشد؛ برعکس بعضی دیگر از الگوریتم‌ها همگرایی نداشته ولی عملکرد آنها خیلی خوب است [۲].

در شرایطی که ما به یافتن جواب در همسایگی جواب بهینه راضی باشیم هدف جستجو را شبه بهینه‌سازی می‌نامند. شبه بهینه‌سازی دارای دوطبقه است؛ اگر هدف، یافتن جواب عملی خوب در فاصله تعریف شده‌ای از جواب بهینه باشد به آن بهینه‌سازی نزدیک گفته می‌شود. اگر شرط فاصله تعریف شده برای جواب بدست آمده حذف گردد و تنها یافتن جواب نزدیک بهینه با احتمال بالا هدف باشد به آن بهینه‌سازی تقریبی گفته می‌شود. بیشتر مسائل عملی آنقدر مشکل هستند که در آنها هدف، شبه بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود تا از این طریق تعادلی بین کیفیت جواب بدست‌آمده و هزینه جستجوی آن جواب برقرار گردد [۳]. هم چنین از آنجایی که تعداد محاسبات مسائل بهینه‌سازی ترکیبی به اعداد نجومی می‌رسد حذف شرط بهینگی یک ضرورت اقتصادی است. در شبه بهینه‌سازی باید الگوریتم‌هایی ارائه کرد که حدود مناسب میزان محاسبات و نزدیکی به بهینگی را تضمین نموده و تعادلی بین آنها برقرار نمایند. این الگوریتم‌ها باید مجهز به پارامترهای قابل تنظیم باشند تا کاربر بتواند با تغییر آن پارامترها تعادل مطلوب بین جواب بدست آمده و میزان محاسبات را برقرار نماید [۴].

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. این خواسته در علوم مهندسی بصورت کاهش مصرف مصالح و یا کاهش هزینه‌های اجرایی نمود پیدا می‌کند.

۲- الگوریتم فراابتکاری

الگوریتم‌های فراابتکاری یا فراتکاملی یا فرااکتشافی نوعی از الگوریتم‌های تصادفی هستند که برای یافتن پاسخ بهینه به‌کار می‌روند. روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی تقسیم‌بندی می‌شوند [۵]. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارایی کافی ندارند و زمان اجرای آن‌ها متناسب با ابعاد مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت هستند. الگوریتم‌های تقریبی نیز به سه دسته الگوریتم‌های ابتکاری (heuristic) و فراابتکاری[۱] و فوق ابتکاری[۲] بخش‌بندی می‌شوند. دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، گیر افتادن آن‌ها در نقاط بهینه محلی، همگرایی زودرس به این نقاط است [۶]. الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل این مشکلات الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شده‌اند. در واقع الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راهکارهای برونرفت از نقاط بهینه محلی هستند و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند. رده‌های گوناگونی از این نوع الگوریتم در دهه‌های اخیر توسعه یافته‌است که همه این‌ها زیر مجموعه الگوریتم فراابتکاری می‌باشند [۷].

از الگوریتم‌های شناخته شده فراابتکاری بر پایه جمعیت می‌توان الگوریتم‌های تکاملی (الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی ژنتیک، ...) بهینه‌سازی کلونی مورچگان، کلونی زنبورها، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم بهینه‌سازی جنگل الگوریتم بهینه سازی Battle Royal الگوریتم قهرمانی در لیگ‌های ورزشی، بهینه‌سازی ملهم از فیزیک نور، الگوریتم ریشه-پاجوش و الگوریتم چکه آبهای هوشمند را نام برد [۸].

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های فرابتکاری جدیدی با توجه به موجودات زنده موجود در طبیعت (الهام گرفته از طبیعت) توسعه داده شده‌اند که از معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، الگوریتم بهینه‌سازی سنجاقک، الگوریتم بهینه‌سازی گرده افشانی گل‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ یا وال، الگوریتم بهینه‌سازی ملخ و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی پنگوئن‌های امپراتور نام برد. اخیرا، به‌نظر می‌رسد روند توسعه جدیدی از الگوریتم‌ها با الهام گرفتن از علم دیرینه‌شناسی و علوم باستان آغاز شده‌است. این الگوریتم‌ها که در دسته جدید الهام گرفته از دوران باستان، قرار می‌گیرند با بررسی ویژگی‌های دوران باستان سعی می‌کنند نوعی بهینه‌سازی ایجاد کنند [۹].

الگوریتم‌های جست‌وجوی فراکاوشی با الهام از پدیده‌های طبیعی به سرعت برای حل مسائل بهینه‌سازی در زمینه‌های مختلف علمی از جمله مهندسی عمران رشد قابل توجهی پیدا کردند. از نکات قوت این الگوریتم‌ها را می‌توان حل مسئله در یک فضای گسترده بدون نیاز به تابع هدف پیوسته یا مشتق‌پذیر دانست.

۲-۱- الگوریتم GA

الگوریتم ژنتیک[۳] تکنیک جستجویی در علم رایانه برای یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی و مسائل جستجو است. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکامل است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند.

[۱] meta-heuristic
[۲] hyper heuristic
[۳] Genetic Algorithm

الگوریتم ژنتیک که به‌عنوان یکی از روش‌های تصادفی بهینه‌یابی شناخته شده، توسط جان هالند در سال ۱۹۶۷ ابداع شده‌است. بعدها این روش با تلاش‌های گلدبرگ ۱۹۸۹، مکان خویش را یافته و امروزه نیز بواسطه توانایی‌های خویش، جای مناسبی در میان دیگر روش‌ها دارد. الگوریتم‌های ژنتیک معمولاً به عنوان یک شبیه‌ساز کامپیوتر که در آن جمعیت یک نمونه انتزاعی (کروموزوم‌ها) از نامزدهای راه‌حل یک مسأله بهینه‌سازی به راه حل بهتری منجر شود، پیاده‌سازی می‌شوند. به طور سنتی راه‌حل‌ها به شکل رشته‌هایی از ۰ و ۱ بودند، اما امروزه به گونه‌های دیگری هم پیاده‌سازی شده‌اند. فرضیه با جمعیتی کاملاً تصادفی منحصر بفرد آغاز می‌شود و در نسل‌ها ادامه می‌یابد. در هر نسل گنجایش تمام جمعیت ارزیابی می‌شود، چندین فرد منحصر در فرایندی تصادفی از نسل جاری انتخاب می‌شوند (بر اساس شایستگی‌ها) و برای شکل دادن نسل جدید، اصلاح می‌شوند (کسر یا دوباره ترکیب می‌شوند) و در تکرار بعدی الگوریتم به نسل جاری تبدیل می‌شود [۱۰].

۲-۲- الگوریتم PSO

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۴] یا به اختصار PSO، یک روش سراسری بهینه‌سازی است که با استفاده از آن می‌توان با مسائلی که جواب آن‌ها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی می‌باشد، برخورد نمود. در اینچنین فضایی، فرضیاتی مطرح می‌شود و یک سرعت ابتدایی به آن‌ها اختصاص داده می‌شود، همچنین کانال‌های ارتباطی بین ذرات در نظر گرفته می‌شود. سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند، و نتایج حاصله بر مبنای یک «ملاک شایستگی» پس از هر بازه زمانی محاسبه می‌شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می‌گیرند. علی‌رغم اینکه هر روش در محدوده‌ای از مسائل به خوبی کار می‌کند، این روش در حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته موفقیت بسیاری از خود نشان داده‌است.

۲-۳- الگوریتم SA

الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده[۵] یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ساده و اثربخش در حل مسائل بهینه‌سازی در فضاهای جستجوی بزرگ است. این الگوریتم بیشتر زمانی استفاده می‌شود که فضای جستجو گسسته باشد (مثلاً همه گشت‌هایی که از یک مجموعه از شهرها می‌گذرند). برای مسائلی که پیدا کردن یک پاسخ تقریبی برای بهینه کلی مهمتر از پیدا کردن یک پاسخ دقیق برای بهینه محلی در زمان محدود و مشخصی است، تبرید شبیه‌سازی شده ممکن است نسبت به باقی روش‌ها مانند گرادیان کاهشی دارای ارجحییت باشد. تکنیک تبرید تدریجی، به وسیله متالورژیست‌ها برای رسیدن به حالتی که در آن ماده جامد، به خوبی مرتب و انرژی آن کمینه شده باشد، استفاده می‌شود. هدف از این کار این است که سایز کریستال‌ها در حالت جامد ماده در حال تبرید به بزرگترین حالت برسد. این تکنیک شامل قرار دادن ماده در دمای بالا و سپس کم کردن تدریجی این دماست. شبیه سازی تبرید رویکردی است که مسئله کمینه سازی یک تابع با تعداد بسیار زیادی متغیر است را به یک مسئله مکانیک آماری کاهش می‌دهد. بنیان گذاران این الگوریتم برای حل مسائل سخت بهینه‌سازی، روشی مبتنی بر تکنیک تبرید تدریجی و آرام پیشنهاد نمودند. این محققین برای مدلسازی تبرید یک سیستم به منظور پیدا کردن پاسخ کمینه کلی، از شبیه سازی کامپیوتری استفاده کردند.

[۴] Particle swarm optimization
[۵] Simulated Annealing

۲-۴- الگوریتم HS

الگوریتم جستجوی هارمونی[۱] از الگوریتم‌های معروف فراابتکاری است که بر اساس یک روش موسیقی ارائه شده است که برای حل مسائل بهینه سازی استفاده می‌گردد. هارمونی یکی از مولفه‌های موسیقی است که برای گوش نوازتر شدن و تقویت محتوای موسیقی به آن افزوده می‌شود و طراحی مناسب آن، نیازمند آگاهی به اصول علم هارمونی (حداقل در حد تجربی) است. حتی مخاطبان عام موسیقی، که به صورت تخصصی به قطعات موسیقی گوش فرا نمی‌دهند، در صورت حذف هارمونی از بسیاری از قطعات موسیقی، متوجه کسری و نارسایی در موسیقی خواهند شد. بسیار از موسیقی دانان معروف، دقیقاً به خاطر طراحی آکوردها و هارمونی‌های قوی معروف هستند و زمان بسیار زیادی صرف طراحی و کشف هارمونی‌های مناسب نموده‌اند. از مدل سازی و شبیه‌سازی فرایندی که یک آهنگ ساز برای هارمونیزه کردن یک قطعه موسیقی طی می‌کند، الگوریتمی استخراج شده است که امروزه آن را به نام جستجوی هارمونی یا به اختصار HS می‌شناسیم.

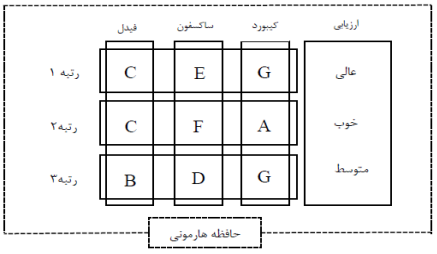
۳- بهینه‌سازی به روش الگوریتم جستجوی هارمونی

۳-۱- متغیر(مفهوم هارمونیک)

پارامترهای الگوریتم هارمونی شامل اندازه حافظه هارمونی (تعداد بردارهای حل در حافظه هارمونی (HM))، نرخ در نظرگیری حافظه هارمونی (HMCR) نرخ تنظیم زیر و بمی (تنظیم کوک (PAR) حداکثر تعداد جست‌وجو (MaxImp) و پهنای باند (BW) می‌باشد که در گام‌های الگوریتم به شرح آن‌ها پرداخته می‌شود. موسیقی‌دانها با توجه به ابزاری که برای ساخت موسیقی در اختیار دارند ابتدا به صورت تصادفی اقدام به نواختن موسیقی با ابزارهای موجود می‌نمایند. این هارمونی درون حافظه موسیقی‌دان نگه‌داری می‌گردد و در مرحله بعدی موسیقی‌دان‌ها با توجه به هارمونی‌های موجود در حافظه خود اقدام به نواختن موسیقی جدید که نسبت به قبلی تغییراتی دارد می‌نماید. ساختار حافظه هارمونی در شکل ۱ نشان داده شده است. جاز سه نفره متشکل از فیدل، ساکسوفون و کیبورد را در نظر بگیرید. حافظه با هارمونی‌های تصادفی((E C G)، (A، F، C) و (G، D، B) پر می‌شود، که بر اساس برآورد زیباشناختی ذخیره می‌شوند. در فرآیند بدیهه سرایی، سه ابزار هارمونی جدید تولید می‌کنند. به طور مثال (C, D, A)، صدای C از فیدل، صدای D از ساکسوفون، صدای A از کیبورد. هر نوت موجود در حافظه شانس برابر برای انتخاب شدن دارد به‌طور مثال هر کدام از نوت‌های E، F یا D ساکسوفون با احتمال ۳۳/۳٪ انتخاب می‌شوند. اگر هارمونی جدید از بدترین هارمونی موجود در حافظه بهتر باشد، جایگزین شده و بدترین هارمونی از حافظه حذف می‌شود. در این مثال (C, D, A) جایگزین (B, D, G) می‌شود. این فرایند تا هنگامی که نتیجه رضایت‌بخش (نزدیک بهینه) حاصل شود تکرار می‌شود.

[۱] Harmony Search

شکل ۱: ساختار حافظه هارمونی [۱۱]



۳-۲- محدودیت‌های متغیر

برای ایجاد ممووری اولیه هر سری از متغیرها پس از انتخاب به صورت تصادفی و پیش از ذخیره‌شدن در ممووری برای ارضای قیدهای مورد نظر کنترل می‌شوند. سری‌هایی که قیدها را ارضا ننمایند حذف‌شده و سری جدیدی امتحان می‌شود تا ممووری به تعداد سری‌های مورد نظر پر شود.

در ادامه الگوریتم و در مرحله اصلاح حافظه (improvise)، به منظور تغییر سری‌ها در حافظه پس از ایجاد سری جدید با استفاده از متدهای این الگوریتم‌ها و یا تغییر سری‌ها در حافظه، سری جدید کنترل‌شده و در صورت پاسخگو نبودن سری جدیدی ایجاد و کنترل می‌شود. این عملیات تا رسیدن به سری قابل قبول ادامه پیدا می‌کند و در نهایت سری به دست آمده در ممووری جایگزین سری‌های دیگر شده و الگوریتم ادامه پیدا می‌کند.

٤- مشخصات مدل

در این تحقیق ۶ خرپا از نوع مسطح و فضایی مورد بررسی قرار گرفته است. خرپاهای مورد بررسی در این تحقیق به ترتیب ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۵۲، ۷۲ و ۲۰۰ عضوی هستند. در بررسی هر کدام از خرپاها، قیود تغییرمکان گره‌ها و تنش در اعضا بعنوان عامل کنترل ناپایداری مدنظر بوده و در بهینه‌سازی وزن آنها در نظر گرفته شده است. بارگذاری و تغییرمکان‌های گرهی ایجاد شده در خرپاها بر اساس مقالات گذشته و آنچه که در آنها تعریف شده است، واردشده و ارزیابی گشته‌اند.

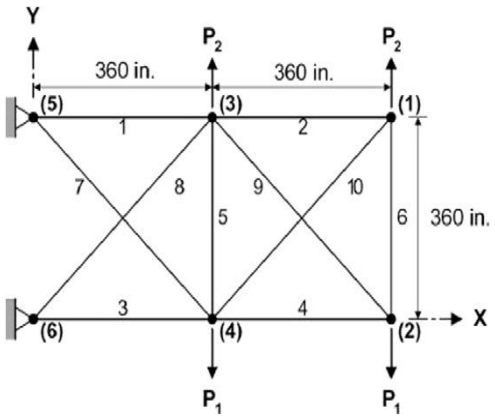
۴-۱-۱- مشخصات خرپای ۱۰ عضوی

خرپای زیر یک خرپای مسطح ۱۰ عضوی است که با دو تکیه‌گاه مفصلی ثابت به زمین وصل شده‌است. در خرپای زیر دو بار گرهی به مقدار ۱۰۰ کیلوپوند وارد شده‌است. مدول الاستیسیته اعضا و قیود کنترل‌کننده آن به‌شرح زیر بوده‌است. همچنین خرپای فوق در شکل ۲ نشان داده شده‌است

جدول ۱: مشخصات مصالح خرپا

Material properties:
E= 10000 ksi
Density = 0.1 lb/in^3
Allowable displacements at nodes $\leq$2 in
Allowable stress $\leq$ 25 ksi

شکل ۲: خرپای مسطح ۱۰ عضوی



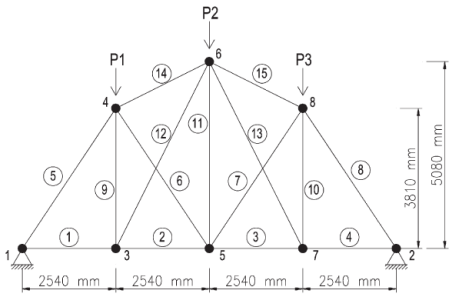
۴-۱-۲- مشخصات خرپای ۱۵ عضوی

خرپای زیر یک خرپای مسطح ۱۵ عضوی است که در سه گره به آن بار وارد شده است. در این خرپا، بارها با سه نوع ترکیب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. خرپای زیر با دو تکیه‌گاه مفصلی ثابت به زمین متصل شده است. مشخصات مصالح خرپای زیر به همراه بارها و قیود کنترل کننده ذیلاً آورده شده است. خرپای ۱۵ عضوی در شکل ۳ نشان داده شده‌است.

جدول ۲: مشخصات مصالح و نیروهای خرپا

Material properties:		
E= 200 Gpa		
Density = 7800 kg/m^3		
Constraints:		
Allowable displacements at nodes $\leq$10 mm		
Allowable stress (in tension and compression) $\leq$120 Mpa		
Number of cases = 1		
Load case 1:	Load case 2:	Load case 3:
P1= 35 KN	P1= 35 KN	P1= 35 KN
P2= 35 KN	P2= 0	P2= 35 KN
P3= 35 KN	P3= 35KN	P3= 0

شکل ۳: خرپای مسطح ۱۵ عضوی



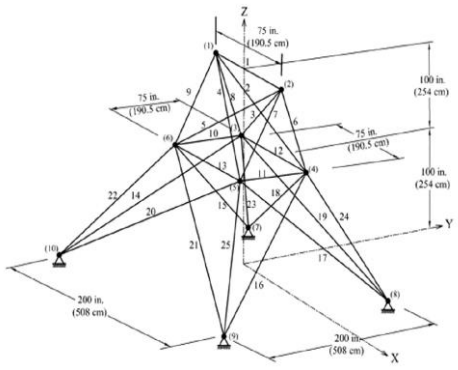
۴-۱-۳- مشخصات خرپای ۲۵ عضوی

خرپای ۲۵ عضوی یک سازه فضایی برای دکل‌های انتقال نیرو هست که با چهار تکیه‌گاه مفصلی ثابت به زمین وصل شده‌است. مشخصات مکانیکی خرپای فوق در ذیلا آورده شده‌است. همچنین نمای خرپای مورد نظر در شکل ۴ نشان داده شده‌است.

جدول ۳: مشخصات مصالح و نیروهای خرپا

Material properties:
E= 10000 ksi
Density = 0.1 lb/in^3
Constraints:
Allowable displacements at nodes $\leq$0.35 in
Allowable stress (in tension and compression) $\leq$ 40 ksi

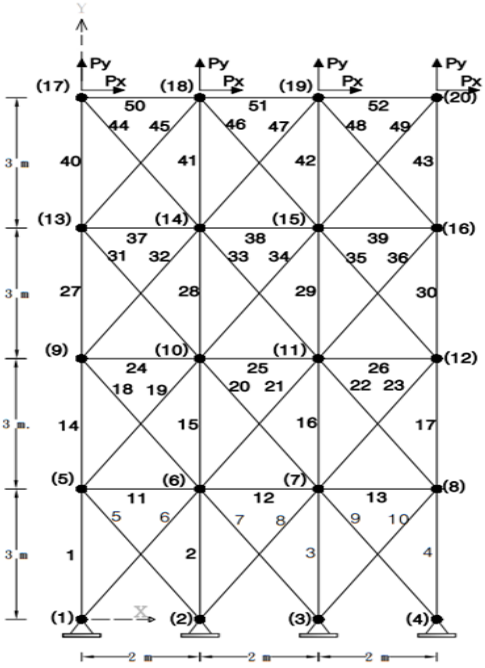
شکل ۴: خرپای مسطح ۲۵ عضوی



۴-۱-۴- مشخصات خرپای ۵۲ عضوی

در این خرپا، بهینه‌یابی مقطع سازه خرپایی ۵۲ عضوی دوبعدی با قید تنش ۱۸۰/۵ مگاپاسکال نشان داده شده در شکل ۵ مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف از بهینه‌یابی، انتخاب مقاطع مناسب به منظور کمینه‌سازی وزن سازه با رعایت قیود حاکم بر مسئله (در اینجا قید تنش) می‌باشد. متغیرهای طراحی مسئله (سطح مقطع اعضا) از نوع گسسته می‌باشد. نیروهای ۱۰۰ کیلونیوتون و ۲۰۰ کیلونیوتون به‌ترتیب در راستای افق و قائم به بالاترین گره‌های سازه اعمال شده‌است. مشخصات مصالح مصرفی در این مثال عبارتند از: چگالی $\rho=7860\ kg/m^3$ و مدول الاستیسیته $E=2.07\times10^5\ MPa$.

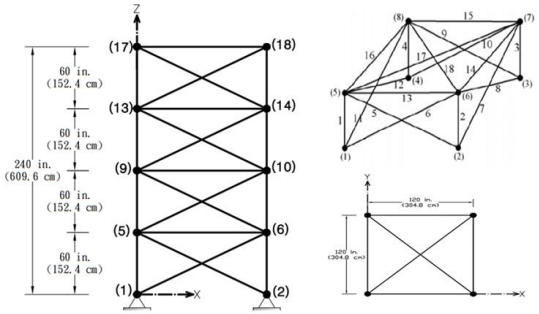
شکل ۵: خرپای مسطح ۵۲ عضوی



۴-۱-۵- مشخصات خرپای ۷۲ عضوی

سازه خرپایی سه بعدی ۷۲ عضوی، نشان داده شده در شکل ۶ تحت قیود تنش و جابجایی اعمال‌شده در این سازه به‌ترتیب $\pm25\ ks$ $(\pm172.375\ MPa)$ و $\pm0.25\ in$ $(\pm0.635\ cm)$ را بعنوان پنجمین خرپا در این تحقیق ارزیابی شده‌است. مدول الاستیسیته و چگالی مصالح مصرفی در سازه مورد بررسی این تحقیق به‌ترتیب عبارتند از: $10{,}000\ ksi$ $(68{,}950\ MPa)$ و $0.1\ lb/in^3$ $(2767.99\ kg/m^3)$. در این سازه ۴ گره فوقانی ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ تحت بارگذاری $5\ kips$ $(22.25\ kg)$ در جهت محورهای x، y و خلاف جهت محور z قرار گرفته است.

شکل ۶: خرپای مسطح ۷۲ عضوی



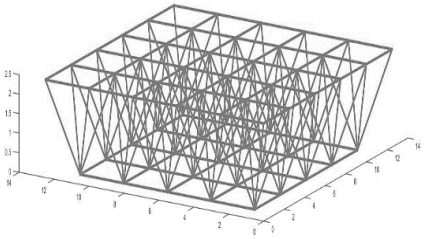
۴-۱-۶- مشخصات خرپای ۲۰۰ عضوی

در این خرپا یک سازه فضاکار دولایه مطابق شکل ۷ با استفاده از روش جستجوی هارمونی ترکیبی (HHS) ارزیابی شده‌است. مشخصات مکانیکی مصالح و مشخصات هندسی خرپای فوق به شرح ذیل می‌باشد.

جدول ۴: مشخصات مصالح و نیروهای سازه فضاکار

Material properties:
E= 200 GP
Density = 7850 kg/m^3
Length of horizontal membors= 2 m
Number of members along each= 5
Height of space structure= 2.5 m

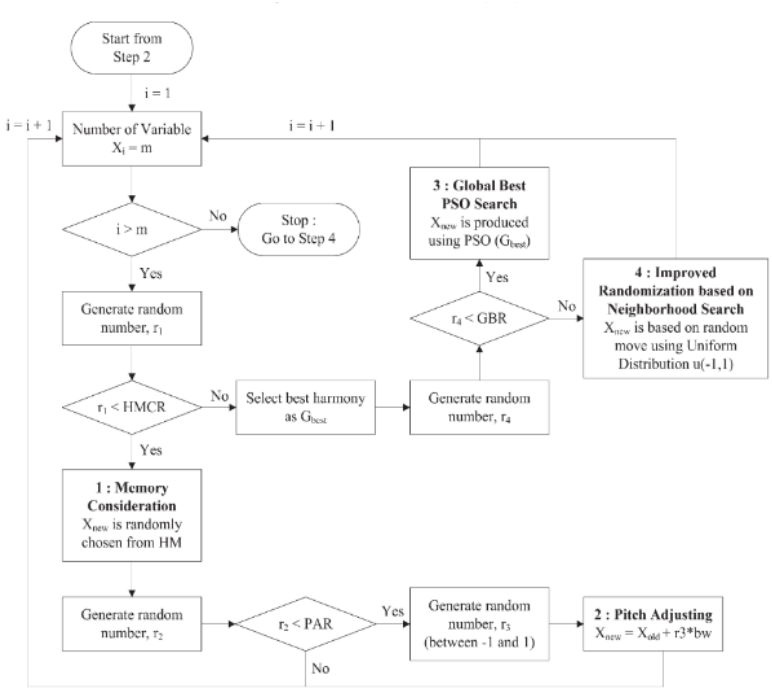
شکل ۷: سازه فضاکار مورد مطالعه جهت بهینه سازی



۵- فلوچارت روش الگوریتم جست‌وجوی ترکیبی

برای انجام الگوریتم جست‌وجوی ترکیبی از فلوچارت و گام‌بندی مناسب این روش برای یافتن وزن کمینه با حداقل تکرار استفاده شده است. گام‌بندی روش فوق همانند شکل ۸ می‌باشد.

شکل ۹: فلوچارت روش جست‌وجوی ترکیبی



۶- بررسی نتایج

نتایج حاصل از بهینه‌سازی وزن خرپاها با روش الگوریتم جست‌وجوی ترکیبی برای ۶ خرپا با تعداد اعضای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این شش خرپا، با رعایت قیدها، وزن کمینه با انتخاب سطح مقطع مناسب برای عضو، بهینه‌سازی شده‌اند. در هر کدام از خرپاها مقاطع بهینه انتخاب شده و بهترین وزن آنها انتخاب و برای هرکدام جداگانه نشان داده شده‌است.

۶-۱- بهینه‌سازی خرپای ۱۰ عضوی

مشخصات مقاطع مورد استفاده برای این خرپا در ذیل آورده شده‌است که از ۱/۶۲ تا ۳۳/۵ تنظیم شده‌اند. همچنین پارامترهای مورد استفاده برای این خرپا نیز ذیلا آورده شده‌است. با انجام بهینه‌سازی برای این خرپا، وزن کمینه در ۶۳۰۰ تکرار بهینه شده‌است. مقاطع بهینه انتخاب شده بری این خرپا نیز در جدول ۵ آورده شده‌است که وزن کمینه برابر ۵۴۹۰ پوند انتخاب شده‌است.

جدول ۵: مشخصات مقاطع بهینه خرپای ۱۰ عضوی

Variables (in^2)	HHS
A1	850.9
A2	41.148
A3	581.66
A4	360.68
A5	41.148
A6	41.148
A7	202.438
A8	581.66
A9	558.8
A10	41.148
Best (LB)	2490.557
Number of iterations	6300

۶-۲- بهینه‌سازی خرپای ۱۵ عضوی

مشخصات مقاطع مورد استفاده برای این خرپا در ذیل آورده شده‌است که از ۱۱۳/۲ تا ۱۰۶۳/۷ تنظیم شده‌اند. هم‌چنین پارامترهای مورد استفاده برای این خرپا نیز ذیلا آورده شده‌است. با انجام بهینه‌سازی برای این خرپا، وزن کمینه در ۷٤۰۰ تکرار بهینه شده‌است. مقاطع بهینه انتخاب شده بری این خرپا نیز در جدول ٦ آورده شده است که وزن کمینه برابر ۱۰۵/۷۳۵ کیلوگرم بوده تعیین شده‌است.

جدول ۶: مشخصات مقاطع بهینه خرپای ۱۵ عضوی

Variables (mm2)	HHS
A1	113.2
A2	113.2
A3	113.2
A4	113.2
A5	736.7
A6	113.2
A7	113.2
A8	736.7
A9	113.2
A10	113.2
A11	113.2
A12	113.2
A13	113.2
A14	334.3
A15	334.3
Best (kg)	105.735
Number of iterations	7400

۶-۳- بهینه‌سازی خرپای ۲۵ عضوی

مشخصات مقاطع مورد استفاده برای این خرپا در ذیل آورده شده‌است که از ۰/۱ تا ۳/۴ تنظیم شده‌اند. همچنین پارامترهای مورد استفاده برای این خرپا نیز ذیلا آورده شده‌است. مقاطع بهینه در ترمیب بار اول و دوم در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷: مشخصات مقاطع بهینه خرپای ۲۵ عضوی

	1	2
Variables (mm^2)	HHS	HHS
A1	64.516	6.4516
A2-A5	193.548	1290.32
A6-A9	2193.54	2322.57
A10-A11	64.516	6.4516
A12-A13	1354.83	6.4516
A14-A17	645.16	516.128
A18-A21	322.58	1032.25
A22-A25	2193.54	1548.38
Best (LB)	219.92	254.28
Number of iterations	5500	6000

۶-۴- بهینه‌سازی خرپای ۵۲ عضوی

مشخصات مقاطع مورد استفاده برای این خرپا در ذیل آورده شده‌است که از ۷۱/۶۱۳ تا ۲۱۶۱۲/۸۶ تنظیم شده‌اند. همچنین پارامترهای مورد استفاده برای این خرپا نیز در زیر بیان شده‌است. با انجام بهینه‌سازی برای این خرپا، وزن کمینه در ۱۲۰ تکرار بهینه شده‌است. مقاطع بهینه انتخاب شده برای این خرپا نیز در جدول ۸ آورده شده‌است که وزن کمینه برابر ۱۰۵/۷۳۵ کیلوگرم تعیین شده‌است.

جدول ۸: مشخصات مقاطع بهینه خرپای ۵۲ عضوی

Variables (mm^2)	HHS
A1~A4	4658.055
A5~A10	1161.288
A11~A13	816.77
A14~A17	3206.45
A18~A23	1045.159

A24~A26	817.77
A27~A30	2180.64
A31~A36	1008.39
A37~A39	641.29
A40~A43	1161.29
A44~A49	1161.29
A50~A52	1045.16
Best (kg)	1957.677

۶-۵- بهینه‌سازی خرپای ۷۲ عضوی

مشخصات مقاطع مورد استفاده برای این خرپا در ذیل آورده شده‌است که از ۰/۱ تا ۳/۲ تنظیم شده‌اند. همچنین پارامترهای مورد استفاده برای این خرپا نیز در زیر بیان شده‌است. با انجام بهینه‌سازی برای این خرپا، وزن کمینه در ۹۱۰۰ تکرار بهینه شده است. مقاطع بهینه انتخاب شده بری این خرپا نیز در جدول ۹ آورده شده‌است.

جدول ۹: مشخصات مقاطع بهینه خرپای ۷۲ عضوی

Variables (mm^2)	HHS
A1-A4	1225.804
A5-A12	322.58
A13-A16	64.516
A17-A18	64.516
A19-A22	903.224
A23-A30	322.58
A31-A34	64.516
A35-A36	64.516
A37-A40	322.58
A41-A48	322.58
A49-A52	64.516
A53-A54	64.516
A55-A58	129.032
A59-A66	387.096
A67-A70	258.064
A71-A72	387.096
Best (lb)	174.8794
Number of iterations	9100

۶-۶- بهینه‌سازی خرپای ۲۰۰ عضوی

برای ایجاد ممووری اولیه هر سری از متغیرها پس از انتخاب به صورت تصادفی و پیش از ذخیره شدن در ممووری برای ارضای قیدهای مورد نظر کنترل می‌شوند. سری‌هایی که قیدها را ارضا ننمایند حذف‌شده و سری جدیدی امتحان می‌شود تا ممووری به تعداد سری‌های مورد نظر پر شود. در ادامه الگوریتم و در مرحله اصلاح ممووری، به منظور تغییر سری‌ها در ممووری پس از ایجاد سری جدید با استفاده از متدهای این الگوریتم‌ها و یا تغییر سری‌ها در ممووری، سری جدید کنترل شده و در صورت پاسخگو نبودن سری جدیدی ایجاد و کنترل می‌شود. این عملیات تا رسیدن به سری قابل قبول ادامه پیدا می‌کند و در نهایت سری به دست آمده در ممووری جایگزین سری‌های دیگر شده و الگوریتم ادامه پیدا می‌کند. مقادیر پارامترهای استفاده شده در این روش در جدول ۱۰ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱۰: مشخصات مقاطع بهینه خرپای ۲۰۰ عضوی

Variables (mm2)	Values
A1	91
A2	71.6
A3	198.1
Best (kg)	639.4
Number of iterations	232

۷- جمع‌بندی نتایج

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه بهینه‌سازی اندازه خرپا با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی و مقایسه نتایج بدست آمده با مطالعات صورت گرفته از طریق الگوریتم ژنتیک نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱. در الگوریتم جست‌وجوی ترکیبی نیل به نقطه کمینه داری سرعت همگرایی چشمگیری می‌باشد. لذا مسئله سرعت فرآیند بهینه یابی از طریق الگوریتم‌های ژنتیک تا حدودی حل شده است. در واقع به دلیل آن که جمعیت اصلی به زیرجمعیت‌های کوچکتری تقسیم می‌شوند و هر جزیره مسئول پرورش زیرجمعیت مربوط به خود می‌باشد؛ لذا سرعت همگرایی در هریک از جزایر به سبب کوچکی جمعیت محوله، بطور فزاینده‌ای رشد می‌نماید.

۲. در الگوریتم‌های متداول به دلیل تأثیر پارامترها و روابط حاکم بر الگوریتم، در برخی مواقع بهینه نسبی حاصل می‌شود که این موضوع سبب می‌شود؛ در برخی اذهان الگوریتم ژنتیک روشی تصادفی تلقی شود. اما الگوریتم جستجوی چند منظوره فراابتکاری به سبب بی‌نیازی نسبی که نسبت به پارامترهای و روابط حاکم بر GA دارد، از اجراهای متوالی برنامه جهت نیل به نقطه کمینه سراسری مبری بوده و با آهنگی ثابت و مطمئن به سمت نقطه کمینه سراسری حرکت می‌نماید.

۳. از آن‌جاکه بهترین کروموزوم‌های هر جزیره در مرحله مهاجرت به جزایر دیگر فرستاده شده و جایگزین کروموزوم‌های ناکارآمد و نا بارور در جزیره مقصد می‌شوند؛ مفهوم نخبه‌گرایی بطور غیرمستقیم بر فضای الگوریتم جستجوی متاهیستریک سایه افکنده است. به‌عبارت دیگر بدین سان بهترین‌های جزایر در روند بهینه‌یابی حفظ می‌شوند ، تا میزان شایستگی رشدی صعودی داشته باشد.

۴. با توجه به تعریف ساختار الگوریتم جستجوی هارمونی در میزان حافظه مصرفی بهینه‌تر از الگوریتم ژنتیک می‌باشد. اگر میزان حافظه هارمونی را متناظر با حافظه مصرفی در جمعیت اولیه در نظر بگیریم. الگوریتم جستجوی هارمونی برای ادامه مراحل

تنها نیازمند حافظه به‌اندازه یک هارمونی می‌باشد درحالی‌که الگوریتم ژنتیک حافظه‌ای برابر همان جمعیت نیاز دارد.
با کمی چشم‌پوشی می‌توان گفت حافظه مصرفی در الگوریتم ژنتیک تقریبا دو برابر حافظه مصرفی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی است.

۵. الگوریتم جستجوی هارمونی در مواردی می‌تواند همانند الگوریتم ژنتیک عمل نماید و حتی به‌نظر می‌رسد در حل بعضی مسائل بتواند سریع‌تر به پاسخ مسئله همگرا گردد. پس الگوریتم جستجوی هارمونی را می‌تواند در حل بعضی مسائل جایگزین مناسب و توانایی برای الگوریتم ژنتیک به‌حساب آورد.

۷-منابع

[1] Z.W. Geem, J.H. Kim, G.V. Loganathan. 2001. "A new heuristic optimization algorithm: harmony search", SIMULATION 76 (2) 60–68.
[2] Dorn, W. C., Gomory, R. E. and Grenberg, H. 1964. "Automatic design of optimal structures", JMech, Vol. 3, No. 1, pp. 25-52.
[3] Hayalioglu, M. S. 2004. "Optimum load and resistance factor design of steel space frames using genetic algorithm", Structural and Multidisciplinary Optimization, V. 21, No. 4, pp. 292-299.
[4] Dominguez, A., Stiharu, I. and Sedaghati, R. 2006. “Practical design optimization truss structures using the genetic algorithms”, Research in Engineering Design, Vol. 17, No. 2, pp. 73-84.
[5] S. Rajeev and C.S. Krishnamoorthy. 1992. “Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms”, J. Struct. Engng ASCE, Vol. 118(5), 1233-1250.
[6] Hayalioglu, M. S. 2004. "Optimum load and resistance factor design of steel space frames using genetic algorithm", Structural and Multidisciplinary Optimization, V. 21, No. 4, pp. 292-299.
[7] Jenkins, W.M. 1992. "Plane frame optimum design environment based on genetic algorithm", Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 11, pp. 3013- 3013.
[8] Rozvany, GIN., Zhou, M. and Gollub, W. 1990. "continuumtype optimality criteria methods for larg finite-lement systems whit a displacement constraint", Struct Opti, Vol. 2, pp. 77-104.
[9] J. Kennedy, R. Eberhart. 1995. "Particla swarm optimization", Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, Perth, Astralia, pp. 1942-1948.
[10] Z.W. Geem, J.H. Kim, G.V. Loganathan. 2001. "A new heuristic optimization algorithm: harmony search", SIMULATION 76 (2) 60–68
[11] Dorn, W. C., Gomory, R. E. and Greenberg, H. 1964. "Automatic design of optimal structures", JMech, Vol. 3, No. 1, pp. 25-52.