

بهینه‌سازی سازه‌های صنعتی از منظر انرژی با استفاده از روش تحلیل شبکه‌ی ANP

سیم‌ها صمدیان فرد (دانشجوی دکتری)

وهب توفیق* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف (پهار ۲۰۲۰)
دوری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۲۳-۲۷، (پژوهشی)

روند فزاینده‌ی مصرف انرژی در صنعت ساختمان، مهندسان و طراحان سازه را به سمت بررسی روش‌هایی سوق داده است که در طی چرخه‌ی ساخت تا تخریب، میزان انرژی کمتری را مصرف می‌کنند. تقویت ویژگی‌های رسانش حرارتی المان‌های سازه‌ی و غیرسازه‌ی در کنار ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی علاوه بر گسترش زمینه‌های کاربردی مصالح مذکور، موجب کاهش قابل ملاحظه‌ی میزان انرژی مصرفی و کاهش پیامدهای مخرب زیست‌محیطی می‌شود، که هم‌سو با اهداف توسعه‌ی پایدار نیز است. در پژوهش حاضر، از روش ارتقاء‌یافته‌ی تحلیل شبکه‌ی (ANP) به منظور انتخاب پانل سازه‌ی و فولاد مناسب برای اجزاء سازه‌ی، به عبارت بهتر، سازه‌ی بهینه از نظر انرژی، استفاده شده است. معیارهای انتخاب سازه‌ی بهینه در مطالعه‌ی حاضر، ضریب رسانش حرارتی پانل‌ها، مدت زمان تأخیر حرارتی، وزن سازه و هزینه‌ی ساخت هستند. به منظور محاسبه‌ی پارامترهای مذکور، با مدل‌سازی یک سوله‌ی سه دهانه‌ی در نرم‌افزار SAP 2000 V19/2 و با استفاده از روش ANP، انتخاب سازه‌ی بهینه از نظر میزان مصرف انرژی میسر شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که سوله با فولاد ST37 و استفاده از پانل با ضخامت ورق عایق ۴ سانتی‌متری، رفتاری بهینه از منظر معیارهای مفروض خواهد داشت.

واژگان کلیدی: سوله، پانل‌های ساختمانی، کاهش مصرف انرژی، پارامترهای رسانش حرارتی، بهینه‌سازی.

sima.samadianfard@sharif.edu
toughigh@sharif.edu

۱. مقدمه

نرخ فزاینده‌ی نیاز به کاهش مصرف انرژی و بهبود سطح عملکرد زیرساخت‌های موجود، روش‌های نوین ساخت و ساز و تعبیه‌ی سیستم‌های جدید عایق حرارتی برای سازه‌های صنعتی را مورد توجه پژوهشگران سازه قرار داده است.^[۱] در سال ۲۰۱۳، ۴۵٪ از میزان کل انرژی مصرفی در ایران به بخش ساخت و ساز ارتباط داده شده است که ۴ الی ۵ برابر انرژی مصرفی کشورهای اروپایی است.^[۲] به همین دلیل، باید این میزان انرژی مصرفی که به‌عنوان عامل اصلی تغییر اقلیم شناخته شده است، کنترل و روش‌های کاهش آن ارائه شوند.^[۳]

بخش اعظمی از اتلاف انرژی سازه‌های صنعتی از سطوح غیرسازه‌ی آن صورت می‌پذیرد. با این حال، ۲۵٪ از این میزان اتلاف انرژی حرارتی به اجزاء سازه‌ی آن مرتبط می‌شود. درصد کربن موجود در آلیاژهای مختلف فولاد موجب تفاوت در میزان رسانش حرارتی فولادها می‌شود. نتایج مطالعات گوناگون نشان می‌دهند که معیارهای مختلفی باید به‌منظور انتخاب سازه‌ی بهینه از نظر مصرف انرژی در نظر گرفته شود. چنین سازه‌ی باید در کنار تأمین پارامترهای مقاومتی و حرارتی، از نظر هزینه نیز در وضعیت مطلوبی باشد.^[۴] بنابراین انتخاب چنین سیستمی نیازمند روش‌های انتخاب چندمعیاره است. یکی از روش‌های مذکور، روش تحلیل شبکه‌ی (ANP) است.^[۵] روش ANP با ایجاد شبکه‌ی از المان‌های انتخابی و شناسایی روابط بین آن‌ها، حالت‌های مختلف را در نظر می‌گیرد. از روش ANP در مطالعات بسیاری استفاده شده است. آتماکا و باسر^[۶] (۲۰۱۲)، نحوه‌ی توزیع انرژی از نیروگاه‌ها را بررسی کردند. همچنین یوهان و همکاران^[۷] (۲۰۱۵)، با استفاده از روش ANP، یک روش سودمند بهسازی در چین، و میلانی و همکاران^[۸] (۲۰۱۳)، نیز با استفاده از روش اخیر، مصالح مناسبی برای یک فضایما انتخاب کردند.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۴/۲۲، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۱۶، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۱۶.

DOI:10.24200/J30.2022.60619.3120

استناد به این مقاله:

صمدیان فرد، سیم‌ها و توفیق، وهب (۱۴۰۲). «بهینه‌سازی سازه‌های صنعتی از منظر انرژی با استفاده از روش تحلیل شبکه‌ی ANP»، مهندسی عمران شریف، (۱) ۲-۳۹، ص. ۲۳-۲۷

علی‌الخصوص ضریب هدایت حرارتی بستگی دارد. پارامتر ضریب هدایت حرارتی نیز به ویژگی‌های مکانیک حرارتی مصالح مربوط است که در رسانش حرارتی، توزیع پروفیل دمایی در راستای ضخامت مواد و عایق‌های پوشاننده‌ی جداره‌ی ساختمان‌ها تأثیر می‌گذارد. برقراری جریان حرارتی در داخل نمونه برای به‌دست آوردن رژیم همگن دائمی، ضروری است. هنگامی که جریان حرارتی برقرار شود، ضریب هدایت حرارتی با استفاده از قانون فوریه (رابطه‌ی ۲)، محاسبه می‌شود:

$$q = k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

که در آن، q نرخ جریان حرارتی (W)، dT اختلاف دمایی بین دو سمت نمونه ($^{\circ}C$)، dx ضخامت نمونه (m) و k ضریب هدایت حرارتی ($W^{\circ}C^{-1}m^{-1}$) هستند. روش‌های اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی به دو گروه اصلی روش‌های پایا و گذرا تقسیم می‌شوند و عوامل قابل ملاحظه‌ی در تعیین آن‌ها تأثیر می‌گذارد، که عبارت‌اند از: اندازه‌ی نمونه‌ها، مدت زمان انجام آزمایش و ابزارهای اندازه‌گیری. در روش ذکر شده، سیمی از آلیاژ پلاتین حرارت دیده در راستای مرکز یک نمونه‌ی استوانه‌ی شکل همگن قرار می‌گیرد به صورت تابع توانی با زمان گرم می‌شود. شرایط مرزی در آزمایش اخیر، شامل دو صفحه‌ی سرد و گرم است و با تکیه بر این فرضیات انجام می‌شود:

۱. صفحات دمایی در تماس کامل با نمونه قرار دارند.

۲. جریان حرارتی تک‌محوره در راستای خط مرکزی نمونه برقرار است.

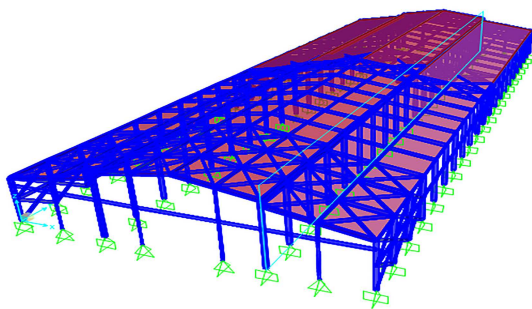
نرخ افزایش دمای سیم به قابلیت رسانش ماده بستگی دارد. در پژوهش حاضر، روش جدیدی برای محاسبه‌ی رسانش حرارتی مواد پیشنهاد شده است. مشکل اصلی روش‌های پایا، مدت زمان طولانی است که برای آزمایش صرف می‌شود. در صورت استفاده از محیط‌های بسته، هوای محبوس موجب افزایش فشار داخلی محفظه می‌شود. با توجه به اینکه پارامترهای فشار و دما ارتباط مستقیمی با هم دارند، اندرکنش این دو سرعت، تغییرات دمایی را افزایش می‌دهد و دما در دو طرف نمونه در مدت زمان کمتری تثبیت می‌شود.

۳. روش پژوهش

۱.۳. مدل‌سازی سوله

به منظور مطالعه‌ی پارامترهای وزن و هزینه، سوله‌ی نشان داده شده در شکل ۲، در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ مدل شده است.

سازه‌ی صنعتی مورد مطالعه، یک سوله با دو نیم‌سوله‌ی مجاور بوده است (شکل ۳) که هر یک از آن‌ها، دارای جرثقیل بوده است؛ به طوری که ظرفیت جرثقیل



شکل ۲. نمای سه‌بعدی سوله.

در پژوهش حاضر، از روش ارتقاء‌یافته‌ی تحلیل شبکه‌ی به منظور انتخاب پانل سازه‌ی و فولاد مناسب برای اجزاء سازه‌ی - به عبارت بهتر، سازه‌ی بهینه از نظر انرژی - استفاده شده است. المان‌های منتخب برای انتخاب سازه‌ی بهینه در مطالعه‌ی حاضر، ضریب رسانش حرارتی پانل‌ها، مدت زمان تأخیر حرارتی، وزن سازه، و هزینه بوده‌اند. در نهایت، با استفاده از روش ANP، نیز انتخاب سازه‌ی بهینه از نظر میزان مصرف انرژی میسر شده است. به منظور محاسبه‌ی پارامترهای مذکور، سوله‌ی سه دهانه‌ی در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰V۱۹/۲ مدل شده است.

۲. تئوری و فرضیات خصوصیات رفتاری مصالح

۱.۲. مدت زمان تأخیر و ضریب کاهش

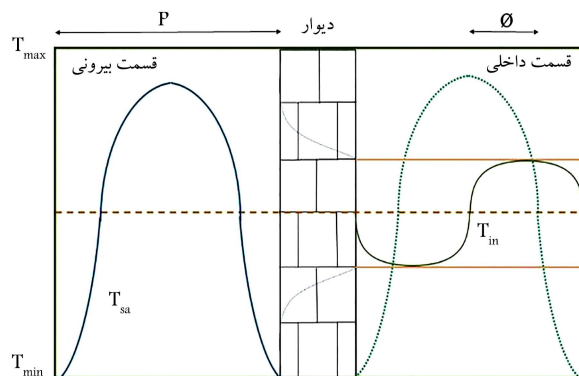
پروفیل دمایی در راستای ضخامت دیوار بستگی به تغییرات دمایی دو طرف دیوار دارد. هنگامی که یک سمت دیوار در معرض تابش منبع انرژی مانند خورشید است، در راستای مقطع دیوار، افزایش دمای تدریجی رخ می‌دهد و نسبتی از مقدار تغییر یافته‌ی آن به سمت داخلی نمونه می‌رسد. مدت زمانی که طول می‌کشد تا پدیده‌ی مذکور رخ دهد را مدت زمان تأخیر و نسبت بزرگی این دو مقدار را ضریب کاهش می‌نامند. ویژگی‌های مکانیک حرارتی مصالح ساختمانی در مقدار پارامترهای اشاره شده، تأثیر می‌گذارند. در طول این حالت گذرا، توزیع پروفیل دمایی به صورت سینوسی تغییر می‌کند. متغیرهای مدت زمان تأخیر به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شوند:

$$LT = T_{max,out} - T_{max,in} \quad (1)$$

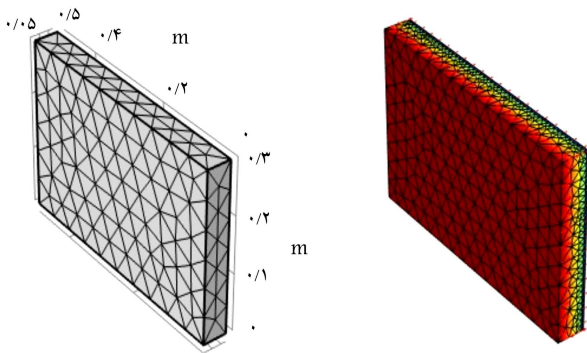
که در آن، $T_{max,out}$ بیشینه‌ی دما و $T_{min,out}$ کمینه‌ی دمایی است که سطح خارجی دیوار که در تماس با محیط بیرون است، تجربه می‌کند. به طور مشابه، $T_{max,in}$ بیشینه‌ی دما و $T_{min,in}$ کمینه‌ی دمایی است که سطح داخلی دیوار تجربه می‌کند. در شکل ۱، نمای شماتیک از پارامتر مدت زمان تأخیر مشاهده می‌شود. برای یک دوره‌ی تناوب از بارگذاری حرارتی، P دوره‌ی تناوب، T_{sa} پروفیل بارگذاری حرارتی اعمال شده و T_{in} مقدار تغییرات دمایی است که هوای محیط داخل تجربه می‌کند. در شکل ۱، Φ به عنوان مدت زمان تأخیر شناخته می‌شود که همان مدتی است که طول می‌کشد تا هر دو طرف دیوار به بیشترین دمای خود برسند.

۲.۲. ضریب رسانش حرارتی

ویژگی‌های نارسائایی حرارتی سازه‌ها به پارامترهای حرارتی مواد سازنده‌ی آن‌ها،



شکل ۱. نمای شماتیک پارامتر مدت زمان تأخیر.



شکل ۵. نمونه‌یی از پانل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار COMSOL MULTI-PHYSICS.

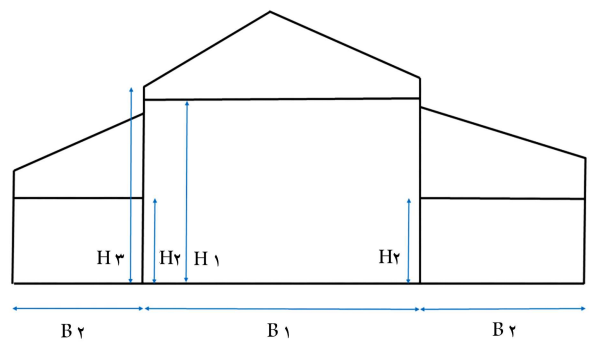
۳.۳. روش ANP

طراحی یک سازه‌ی صنعتی که از نظر مصرف انرژی بهینه باشد، باید از جهات متفاوتی ارزیابی شود. به طور خلاصه، بهبود عملکرد حرارتی، تأمین مقاومت موردنظر و استفاده از مواد کم‌هزینه و با وزن کم، پارامترهای اصلی طراحی هستند، با وجود اینکه برخی از پارامترها در تضاد با هم هستند. به عنوان مثال، طراحی یک سازه با وزن پایین، مستلزم استفاده از مصالح گران‌قیمت است. روش ANP حالت تعمیم‌یافته‌ی روش AHP^۴ است.^[۶] در روش AHP، انتخاب‌ها مستقیماً توسط معیارها رتبه‌بندی می‌شوند. در بالای هرم، گره ارزش میزان اهمیت هر معیار را مشخص می‌کند. در پایین هرم مذکور، نیز انتخاب‌ها مستقیماً توسط معیارهای پذیرش ارزیابی می‌شوند. بنابراین، در روش AHP، همبستگی معیارها در نظر گرفته نمی‌شود. در روش AHP، انتخاب‌ها نیز تأثیری در معیارها ندارند. روش ANP، این محدودیت‌ها را برطرف کرده است، به گونه‌یی که معیارها بر هم تأثیر گذاشته و بازخورد آن در نتایج آشکار می‌شود. المان‌های تصمیم‌گیری به صورت گره‌های یک شبکه در گروه‌های مجزا قرار می‌گیرند. نمای شماتیک دو روش ANP و AHP در شکل ۶ مشاهده می‌شود. چهارگام در حل یک مسئله‌ی تصمیم‌گیری به این صورت است:

۱. انتخاب المان‌های تصمیم‌گیری،
۲. تعیین ارتباط بین معیارها،
۳. مطالعه‌ی مقایسه‌یی گره به گره معیارها،
۴. ایجاد یک ماتریس وزنی و غیروزنی (شکل ۷).

۴. تحلیل نتایج

پارامترهای بهینه‌سازی، شامل: وزن، هزینه، ضریب هدایت حرارتی و مدت زمان تأخیر حرارتی بوده‌اند. پارامترهای حرارتی مطابق جدول ۳ محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت لایه‌ی XPS، از مقدار ضریب هدایت حرارتی کاسته شده و مدت زمان تأخیر حرارتی افزایش یافته است. با این حال، عدم وجود ورق آلومینیومی، تأثیر قابل توجهی در افزایش مدت زمان تأخیر با افزایش ضخامت XPS داشته است. از طرف دیگر، با طراحی سازه به روش تحلیل طیفی و با دو نوع فولاد ST۳۷ و ST۵۲، وزن سازه به ترتیب ۳۲۰ و ۲۲۵ تن به دست آمده است. به علاوه، هزینه‌ی ساخت سوله نیز کاهش یافته است. قابل ذکر است که تفاوت در هزینه‌ی ساخت پانل‌ها، موجب تفاوت چشم‌گیری در هزینه‌ی کلی ساخت سوله



شکل ۳. نمای جانبی سازه‌ی مطالعه شده.



شکل ۴. پلان سازه.

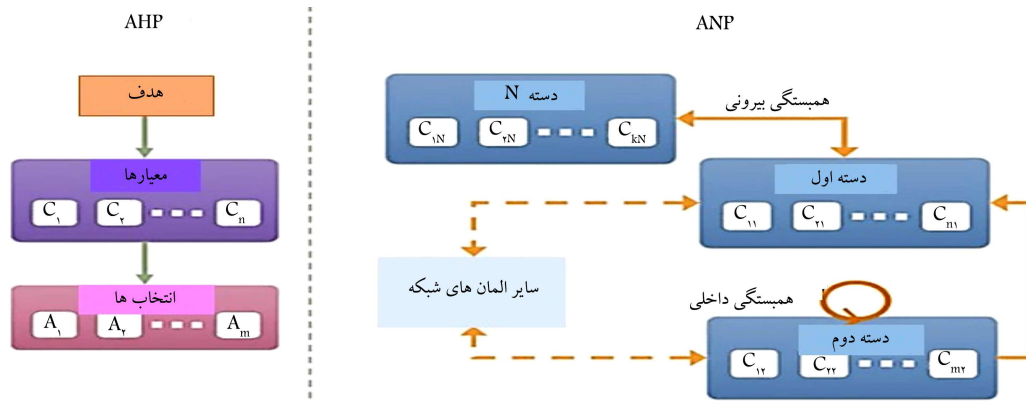
جدول ۱. ابعاد سازه.

$H_3(m)$	$H_2(m)$	$H_1(m)$	$B_2(m)$	$B_1(m)$	$A(m)$
۱۳	۷	۱۱	۱۳	۲۲	۱۲۵

سازه‌ی اصلی، ۱۰۰ تن و چرنقیل سازه‌های فرعی، ۵۰ تن بوده است. ابعاد سوله در شکل ۴ و جدول ۱ ارائه شده است. ساختمان مذکور با کاربرد تجاری - صنعتی، یک طبقه دارد. سازه‌ی اشاره شده، یک بار با مقاطع ساخته شده از فولاد ST۳۷ و بار دیگر با فولاد ST۵۲ تحلیل و طراحی شده است.

۲.۳. تعریف پانل‌های عایق

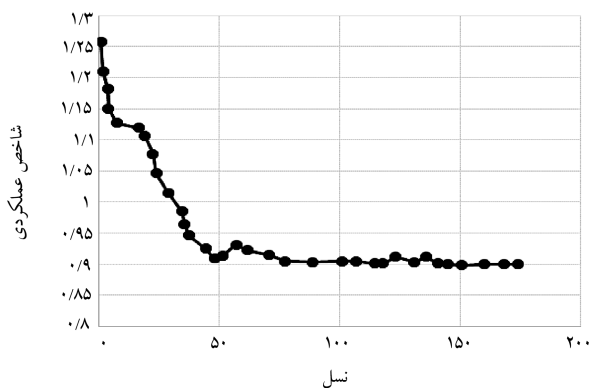
در مطالعه‌ی حاضر، ۵ نوع پانل بررسی شده و ضخامت ورق XPS^۲ در هر یک از آن‌ها از ۱ تا ۵ سانتی‌متر متغیر بوده است. سه نوع از پانل‌های مذکور (P_1, P_2, P_3) دارای ورق آلومینیوم ۴۰۰۰ بودند. با افزایش ضخامت و داشتن ورق آلومینیومی، قیمت پانل تا ۲/۵ برابر پانل ساده افزایش می‌یابد. در جدول ۲، مشخصات پانل‌های بررسی شده در مطالعه‌ی حاضر ارائه شده است. ضریب هدایت حرارتی و مدت زمان تأخیر حرارتی پانل‌های مذکور - مطابق روش ذکر شده در نوشتار توفیق و صمدیان‌فرد (۲۰۲۰)^[۷]، با استفاده از نرم‌افزار COMSOL MULTIPHYSICS محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق شکل ۵، ابعاد دیوار مدل شده، $5 \times 50 \times 30$ سانتی‌متر بوده و به صورت مثلثی با طول ضلع بیشینه‌ی ۵ سانتی‌متری، مش بندی شده است. به منظور مدل‌سازی دیوار از مازول Heat Transfer استفاده شده است که در آن با استفاده از قانون فوریه برای انتقال حرارت و با در دست داشتن شار حرارتی، ضرایب هدایت حرارتی و مدت زمان تأخیر محاسبه شده‌اند.



شکل ۶. نمای شماتیک شبکه‌های ANP و AHP. [۶]

جدول ۲. مشخصات پانل‌ها.

شماره	عبارت معرف پانل	ضخامت ورق XPS (cm)	ورق آلومینیوم	هزینه (واحد)	وزن واحد سطح (g/m ²)
۱	P۱	۱	دارد	۱/۰	۹۷۰
۲	P۲	۲	دارد	۱/۷	۱۱۵۰
۳	P۳	۳	دارد	۲/۵	۱۳۴۰
۴	P۴	۴	ندارد	۱/۶۵	۱۲۷۰
۵	P۵	۵	ندارد	۲/۱	۱۳۲۰



شکل ۸. شاخص عملکردی روش ANP.

جدول ۳. ویژگی‌های حرارتی پانل‌های عایق.

شماره	عبارت معرف پانل	ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)	مدت زمان تاخیر (m)
۱	P۱	۰/۲۴	۹۴
۲	P۲	۰/۱۸	۱۱۱
۳	P۳	۰/۱۲	۱۲۰
۴	P۴	۰/۱۱	۱۴۸
۵	P۵	۰/۰۹	۱۵۶

۵. نتیجه‌گیری

به منظور یافتن سازه‌ی صنعتی بهینه با در نظر گرفتن پارامترهای حرارتی، یک سوله با ابعاد ذکر شده به روش تحلیل طیفی یک‌بار با فولاد ST۳۷ و بار دیگر با فولاد ST۵۲ آنالیز و طراحی شد. در دیوارهای سازه‌ی مذکور، از ۵ نوع پانل استفاده و پارامترهای حرارتی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار COMSOL MULTIPHYSICS محاسبه شده است. با در نظر گرفتن ۴ متغیر: وزن، هزینه، مدت زمان تأخیر حرارتی و ضریب هدایت حرارتی، روش بهینه‌سازی ANP بر سازه اعمال و پس از ۱۷۸ نسل، سوله با فولاد ST۳۷ و استفاده از پانل P۴ به عنوان حالت بهینه انتخاب شد. ملاحظه می‌شود در صورتی که طراحی با فولاد ST۵۲ انجام گیرد، با وجود اینکه سازه وزن کمتری خواهد داشت، به دلیل افزایش خارج از محدوده‌ی هزینه‌ها، طرح ST۵۲ اقتصادی نخواهد بود.

$$\begin{pmatrix} W_{11} & \dots & W_{1k} & \dots & W_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{k1} & \dots & W_{kk} & \dots & W_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1} & \dots & W_{nk} & \dots & W_{nn} \end{pmatrix}$$

شکل ۷. ماتریس ANP. [۶]

خواهد شد. با اجرای روش بهینه‌سازی ANP، پس از ۱۷۸ نسل، حالت بهینه به دست آمد. ساخت سوله با استفاده از فولاد ST۳۷ و استفاده از پانل P۴ به عنوان حالت بهینه انتخاب شد. این در حالی است که استفاده از فولاد ST۵۲، وزن سازه را کاهش داده است، ولی قیمت بالای آن، شاخص عملکردی پارامتر وزن را کاهش داده است. در شکل ۸، عملکرد روش ANP و تعداد نسل‌ها مشاهده می‌شود.

پانوشتها

1. Analytic Network Process (ANP)
2. Atmaca & Basar
3. Extruded Polystyrene (XPS)
4. Analytic Hierarchy Process (AHP)

منابع (References)

1. Toufigh, V. and Kianfar, E. "The effects of stabilizers on the thermal and mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts", *Construction and Building Materials*, **200**, pp. 616-629 (2019).
2. Samadianfard, S. and Toufigh, V. "Energy use and thermal performance of rammed-earth materials", *J. Mater. Civ. Eng*, **32**(10), p. 04020276 (2020).
3. Saidi, M., Cherif, A.S., Zeghami, B. and et al. "Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks", *Construction and Building Materials*, **167**, pp. 566-577 (2018).
4. Katunsky, D., Korjenic, A., Katunaska, J. and et al. "Analysis of thermal energy demand and saving in industrial buildings: A case study in Slovakia", *Build. Environ*, **67**, pp. 138-146 (2013).
5. Kosarimovahhed, M. and Toufigh, V. "Sustainable usage of waste materials as stabilizer in rammed earth structures", *Journal of Cleaner Production*, **277**, p. 123279 (2020).
6. Pakand, M. and Toufigh, V. "A multi-criteria study on rammed earth for low carbon buildings using a novel ANP-GA approach", *Energy Build*, **150**, pp. 466-476 (2017).
7. Atmaca, E. and Basar, H.B. "Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP)", *Energy*, **44**(1), pp. 555-563 (2012).
8. Xu, P., Chan, E.H.W., Visscher, H.J. and et al. "Sustainable building energy efficiency retrofit for hotel buildings using EPC mechanism in China: Analytic Network Process (ANP) approach", *Journal of Cleaner Production*, **107**, pp. 378-388 (2015).
9. Milani, A.S.; Shanian, A.; Lynam, C. and et al. "An application of the analytic network process in multiple criteria material selection", *Mater. Des*, **44**, pp. 622-632 (2013).