

انتخاب مصالح نوین مناسب جهت اجرای دیوار غیرباربر در ساختمان‌ها به روش تحلیل سلسله مراتبی

مریم لطفی^۱، محمد هادی علیزاده الیزئی^{۲*}، حسن احمدی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران

چکیده

نظر به این که از عمده آسیب‌های مشاهده شده در زلزله‌های اخیر جدا شدن دیوارهای غیرباربر از اجزای سازه‌ای و ترک‌های بزرگ طولی و قطری در آنها می‌باشد، انتخاب دیوار مناسب برای ساختمان بسیار حائز اهمیت است. با توجه به تنوع دیوارها و تعدد معیارها، اتخاذ تصمیمی که تمام عوامل مؤثر را مدنظر قرار دهد ضروری است. لذا در این مقاله از روش تحلیل سلسله مراتبی که یک روش سازگار با معیارها و اهداف چندگانه در تصمیم‌گیری می‌باشد استفاده شده است. برای شناسایی و تعیین میزان اهمیت معیارهای تأثیرگذار در انتخاب دیوار و مقایسه دقیق دیوارها بر اساس معیارها، از مدل‌سازی عددی و مقایسه‌های تجربی استفاده گردیده است. دیوارها با معیارهای طراحی، اجرا، هزینه و زمان مورد مقایسه قرار گرفتند. دیوارهایی که مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند عبارت از: بلوک سیمانی با دانه رس منبسط شونده (LECA)، پانل ساندویچی (3D panel)، دیوار خشک (Drywall)، بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده (AAC) می‌باشند. در نهایت با به کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی به اولویت‌بندی انواع دیوارهای مناسب برای ساختمان‌ها در مناطق زلزله‌خیز پرداخته شده است. نتایج نشان داد دیوار خشک به جهت امتیازات مشخصه و مقایسه‌های تجربی به عنوان بهترین گزینه و بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده و بلوک‌های سیمانی سبک و پانل‌های ساندویچی به ترتیب در جایگاه‌های بعدی به عنوان گزینه‌های مناسب می‌توانند در ساختمان‌های در معرض زلزله عملکرد بهتری داشته باشند.

کلمات کلیدی: روش تحلیل سلسله مراتبی، دیوار غیر باربر، مصالح نوین، اجزای غیرسازه‌ای، دیوار خشک.

*نویسنده مسئول: محمد هادی علیزاده الیزئی

پست الکترونیکی: Alizadeh.mh@riau.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

۱- مقدمه

در زلزله‌های گذشته مشاهده شده است که عناصر غیرسازه‌ای به مراتب آسیب‌پذیرتر و حساس‌تر از اعضای سازه‌ای می‌باشد [۱]. یکی از عناصر غیرسازه‌ای که بیشترین پتانسیل تخریب کلی ساختمان را دارد، دیوارهای پرکننده است. برای ساختمان‌های مهم باید از خرابی این دیوارها در برابر زلزله جلوگیری شود به طوری که عملکرد این ساختمان‌ها پس از زلزله متوقف نگردد [۲]. شایع‌ترین دلایل کاهش عملکرد ساختمان‌ها در زلزله‌های اخیر، جداشدن دیوارهای جداکننده از اجزای سازه‌ای، ترک‌های بزرگ طولی و قطری در دیوارها و تخریب دیوارهای جداکننده داخلی بوده است [۳]. ممکن است در یک ساختمان پس از بروز بلایای طبیعی سازه ایستایی خود را حفظ کرده باشد، ولی به دلیل آسیب‌های غیرسازه‌ای از خدمت‌رسانی باز بماند. نظر به این که دیوارهای داخلی یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر وزن سازه است، انتخاب گزینه مناسب می‌تواند باعث کاهش بار مرده ساختمان و در نتیجه کاهش نیروی زلزله وارد شده به کل ساختمان گردد.

در مورد عملکرد لرزه‌ای انواع دیوارها آزمایش‌هایی توسط فولوپ و دویینا [۴]، کنوید و دیرلین [۵]، رستروپو و برسوفسکی [۶] انجام شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، پانل‌های سبک به کار رفته در قاب‌ها، نسبت به بلوک‌های سنگین رفتار بسیار خوبی از خود نشان داده و علی‌رغم مقاومت فشاری پایین، ضمن بارگذاری با تحمل تغییر شکل‌ها، خرد نشده و تنها ترک‌های قطری در آنها مشاهده گردیده است. مطالعات انجام گرفته حاکی از آن است که نازک‌کاری دیوارها در حفظ انسجام و یکپارچگی دیوار و افزایش مقاومت و سختی قاب دارای میانقاب نقش اساسی دارد [۷،۸]. با وجود این که انتخاب مناسب‌ترین دیوار جداکننده داخلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، اما در این راستا مطالعات کمی با استفاده از تکنیک‌های علمی صورت گرفته است. فرآیند انتخاب دیوارهای داخلی مناسب برای سازه‌های ساختمانی، به دلیل مشخصات مختلف مصالح و درگیر بودن معیارهای متعدد، یک تصمیم‌گیری چند معیاره محسوب می‌شود. روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، روش‌های مناسبی برای انتخاب یک گزینه مناسب در حالت وجود معیارهای ناهمگون و مختلف در کنار یکدیگر است. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از کارآمدترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد [۹]. این روش قادر است اهداف مختلف را ارزیابی کرده و تفاوت بین دو گزینه را به وسیله بردار اولویت مشخص نماید [۱۰]. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از ابزارهای مفید در تصمیم‌گیری چند معیاره است [۱۱] و در پژوهش‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. الصبحی و کمال کاربرد AHP را در مدیریت پروژه و در انتخاب سیستم پیشبرد پروژه مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۲]. بنرجی و تیواری از AHP برای انتخاب فرآیند بتن‌ریزی استفاده کرده‌اند [۱۳]. تبارک و همکاران از رویکرد شبکه عصبی مصنوعی ANN برای بررسی دوام در مرحله طراحی اولیه ساختمان‌ها کمک گرفته‌اند [۱۴]. دو رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره AHP و ANP برای ارزیابی سطح هوشمندی سیستم‌های ساختمانی هوشمند توسط وونگ و همکاران به کار گرفته شده است [۱۵]. دادویرن از ترکیب روش‌های AHP و PROMETHEE برای انتخاب ماشین‌آلات در پروژه‌های ساختمانی استفاده کرده است [۱۶].

در این تحقیق با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره AHP و با تحلیل و آنالیزهای پی در پی، به انتخاب مناسب‌ترین دیوار غیربرابر برای سازه‌های ساختمانی پرداخته شده است. داده‌های مورد نیاز با استفاده مدلسازی عددی، مقایسه‌های تجربی و پرسشنامه‌ها بررسی شده و در نهایت دیوارها با توجه به معیارهای مختلف به روش AHP تحلیل و اولویت‌بندی گردیده است.

۲- تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

تکنیک AHP نخستین بار توسط توماس ساعتی در سال ۱۹۸۰ مطرح شد. این تکنیک بطور گسترده در حوزه‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره از قبیل ارزیابی، برنامه‌ریزی و توسعه، تصمیم‌گیری، پیش‌بینی و غیره بکارگرفته شده است [۱۷]. در تکنیک AHP یک مسئله پیچیده به تعدادی مسئله ساده تقسیم می‌شود. بدین ترتیب یک مسئله به صورت سلسله مراتبی از مسائل ساده‌تر ساختاردهی و ساده‌سازی می‌شود به گونه‌ای که هدف نهایی در بالاترین سطح سلسله مراتب و گزینه‌های تصمیم‌گیری در پایین‌ترین سطح قرار می‌گیرد. پس از تشکیل سلسله مراتب، تعیین وزن معیارها با استفاده از مقایسه‌های زوجی و با بکارگیری مقیاس ارجحیت ۹ تایی ساعتی انجام می‌شود. مزیت مقایسات زوجی آن است که فرد تصمیم‌گیرنده فارغ از سایر گزینه‌ها تنها به اولویت‌بندی دو گزینه می‌پردازد [۱۸].

پس از تعیین وزن معیارها نوبت به مقایسات زوجی گزینه‌های تصمیم و تعیین اولویت آنها با توجه به تک تک معیارها می‌رسد. یک فرآیند AHP شامل مراحل زیر است:

- تعریف مسئله و مشخص کردن اهداف، معیارها و گزینه‌ها [۱۹]
- ساختار سلسله مراتبی از بالا به سطوح میانی و به پایین‌ترین سطح مسئله که معمولاً مجموعه گزینه‌ها می‌باشند [۱۹].
- تشکیل ماتریس مقایسه زوجی در اندازه $n \times n$ برای هر کدام از سطوح پایین مسئله به همراه یک ماتریس برای هر کدام از عناصر سطح بالایی آن به کمک مقیاس ترجیحات ۹ گانه ساعتی که در جدول ۱ آمده است [۱۹، ۲۰].
- تکمیل ماتریس‌ها با بکارگیری جدول ترجیحات ۹ گانه ساعتی
- از ترکیب سلسله مراتبی جهت وزن‌دهی به بردارهای ویژه استفاده می‌شود. برای این منظور به کمک اوزان معیار و مجموع حاصل از تمامی اوزان بردارهای ویژه که در سطح بعدی سلسله مراتب وارد می‌شوند، عملیات وزن‌دهی صورت می‌پذیرد.

جدول ۱: مقیاس ترجیحات ۹ گانه ساعتی

| مقدار | برتری شدید | برتری بسیار قوی | برتری قوی | برتری متوسط | برتری مساوی | ترجیحات میانی |
|-----------|------------|-----------------|-----------|-------------|-------------|---------------|
| شدت اهمیت | ۹ | ۷ | ۵ | ۳ | ۱ | ۸، ۶، ۴، ۲ |

اگر $C = \{C_j | j=1, 2, 3, \dots, n\}$ مجموعه‌ای از معیارهای تصمیم‌گیری باشد، نتیجه مقایسات زوجی با ماتریس $n \times n$ به نام ماتریس A که در رابطه (۱) نشان داده شده است که در این ماتریس هر یک از مؤلفه‌ها یعنی a_{ij} ، حاصل تقسیم وزن معیار a_{ij} بر وزن معیار a_j است [۲۰]. خارج قسمت این تقسیم در قالب جدول ارجحیت ۹ تایی ساعتی ارائه شده است [۲۱]. محاسبه وزن نهایی معیارها و گزینه‌ها (بردار وزن ماتریس w_1, w_2, \dots, w_i) و تحلیل سازگاری با استفاده از مقدار ویژه ماتریس انجام می‌شود [۲۲]. با توجه به این که قضاوت‌های انسانی کاملاً سازگار نیستند، برای اطلاع از میزان اعتبار قضاوت‌های صورت گرفته باید نرخ ناسازگاری نظرها محاسبه شوند تا در صورتی که میزان ناسازگاری از حد مجاز بیشتر باشد، در قضاوت‌ها تجدید نظر صورت گیرد. آنالیز سازگاری با محاسبه نرخ سازگاری انجام می‌شود. نرخ سازگاری از تقسیم ایندکس سازگاری CI بر ایندکس تصادفی بودن RI بدست می‌آید که RI بر حسب n در جدول ۲ نشان داده شده است. λ_{max} مقادیر ویژه ماتریس است. اگر نرخ سازگاری کمتر از ۰،۱ باشد، نشان‌دهنده آن است که قضاوت‌های انجام شده سازگار

هستند [۲۳] در غیر این صورت لازم است که قضاوتها تجدید نظر شوند. در پایان از تلفیق اوزان گزینه‌ها و معیارها، گزینه برتر شناسایی می‌شود.

$$\tilde{A} = \{\tilde{a}_{ij}\} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

تعیین بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس (λ_{max}) از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$A * w_i = \lambda_{max} * w_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

محاسبه مقدار شاخص ناسازگاری (CI) از رابطه (۳) بدست می‌آید که n بعد ماتریس است.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

محاسبه نرخ ناسازگاری CR از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

جدول ۲: مقدار RI بر حسب تعداد متغیرها

| n | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|----|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| RI | ۰ | ۰ | ۰/۵۸ | ۰/۹ | ۱/۱۲ | ۱/۲۴ | ۱/۳۲ | ۱/۴۱ | ۱/۴۵ | ۱/۴۹ |

۳- متدولوژی

پژوهش انجام شده جهت رسیدن به ارائه مدلی برای رتبه‌بندی مصالح نوین رایج در اجرای دیوارهای غیرباربر در ساختمان‌ها با استفاده از روش AHP می‌باشد. برای انجام محاسبات از نرم‌افزار Expert Choice^{۱۱} که مطرح‌ترین نرم‌افزار در زمینه تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری می‌باشد استفاده شده است. این نرم‌افزار دارای توانایی‌های زیادی بوده و علاوه بر امکان طراحی نمودار سلسله مراتبی، تعیین ترجیحات و اولویت‌ها، محاسبه وزن نهایی، محاسبه نرخ ناسازگاری، تحلیل حساسیت تصمیم‌گیری، استنتاج حالات مختلف، امکان رسم نمودارها و گراف‌های بسیار کاربردی از دیگر توانمندی‌های این نرم‌افزار است.

۳-۱ اعمال روش تصمیم‌گیری AHP

به منظور انتخاب مناسب‌ترین دیوار جداکننده داخلی برای ساختمان‌ها از روش تصمیم‌گیری چند معیاره AHP و نرم‌افزار Expert Choice^{۱۱} استفاده و مراحل زیر طی گردیده است:

- مشخص کردن اجزاء فرآیند تصمیم‌گیری
- تعیین ارتباط بین اجزا و ساختار سلسله مراتبی
- مقایسه زوجی معیارها نسبت به هدف
- مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیارها

- محاسبه امتیاز گزینه‌ها

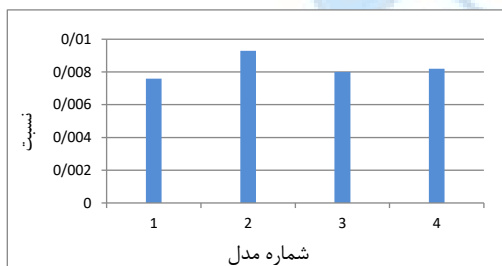
- محاسبه نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی

برای هر انتخاب در روش تحلیل سلسله مراتبی، سه جزء کلیدی لازم است که عبارت است از: هدف، معیارها و گزینه‌ها [۲۰]. هدف در این تحقیق رتبه‌بندی مصالح نوین در ساخت دیوارهای غیرباربر در ساختمان‌ها است و گزینه‌های مورد بررسی عبارتند از: بلوک سیمانی با دانه رس منبسط شونده^۱ (LECA)، پانل ساندویچی (3D panel)، دیوار خشک (Drywall)، بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده^۲ (AAC) که به دلیل رواج آنها در اجرای دیوارهای داخلی انتخاب شده‌اند. در این پژوهش جهت شناسایی معیارهای تاثیرگذار در انتخاب دیوارهای داخلی مناسب برای ساختمان‌ها از منابع مختلف و تجربیات متخصصین این امر استفاده شده است. پس از انتخاب معیارهای مؤثر، دیوارهای غیرباربر بر اساس این معیارها که عبارتند از: معیار طراحی، معیار اجرایی، معیار اقتصادی و معیار زمان مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

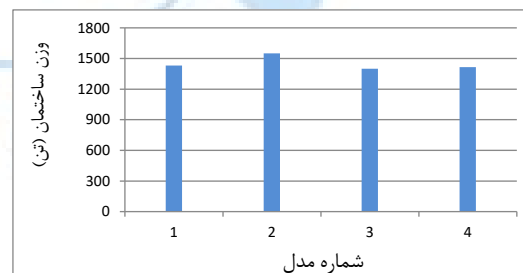
۳-۱-۱ معیار طراحی

به منظور مقایسه دقیق‌تر انواع دیوارها بر اساس معیار طراحی علاوه بر نظرات خبرگان این امر، از نرم‌افزار ETABS برای تحلیل و طراحی استفاده شده است. بدین ترتیب که یک سازه پنج طبقه بتنی چهار بار مدل و پس از تحلیل سازه توسط نرم افزار، طراحی مقاطع انجام شده است. در هر چهار مدل سیستم سازه‌ای، سیستم کف طبقات، سقف، بام و دیوارهای خارجی یکسان در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب که سیستم سازه‌ای، قاب خمشی به علاوه دیوار برشی و سیستم کف طبقات، سقف و بام از نوع تیرچه بلوک و دیوار خارجی، بلوک سفالی می‌باشد و تنها تفاوت مدل‌ها در نوع دیوارهای داخلی می‌باشد که در مدل اول بلوک سیمانی با دانه رس منبسط شونده (LECA)، در مدل دوم پانل ساندویچی (3D Panel)، در مدل سوم دیوار خشک (Drywall) و در مدل چهارم بلوک سیمانی سبک گازی (AAC) در نظر گرفته شده است. سازه در منطقه با زلزله خیزی خیلی زیاد فرض شده و در طراحی مدل‌ها از روش طراحی در حالات حدی استفاده گردیده است. دیوارها بر اساس معیار طراحی با چهار پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفته است که عبارتند از: (۱) نسبت سطح مقطع ستون به سطح پلان سقف (۲) وزن کل ساختمان (۳) وزن میلگرد (۴) برش پایه

نتایج مقایسه‌ها در نمودارهای مربوط به شکل‌های ۱ تا ۴ ارائه گردیده است.



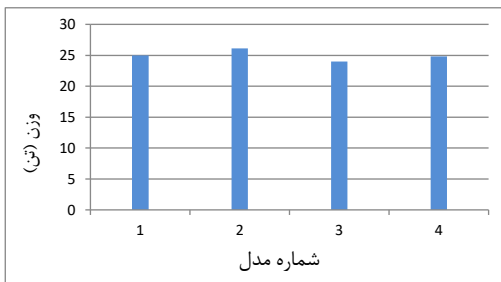
شکل ۲: نمودار نسبت سطح مقطع ستون به سطح پلان.



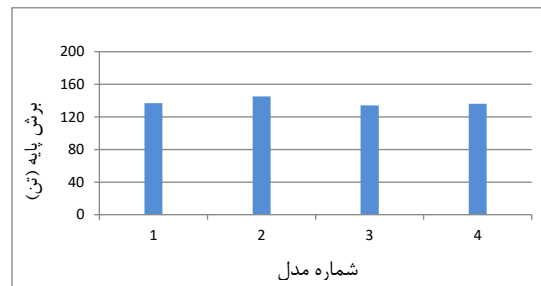
شکل ۱: نمودار وزن کل ساختمان

^۱ Light Expanded Clay Aggregate

^۲ Autoclaved Aerated Concrete



شکل ۴: نمودار وزن میلگردها



شکل ۳: نمودار برش پایه زلزله

۳-۱-۲ معیار هزینه

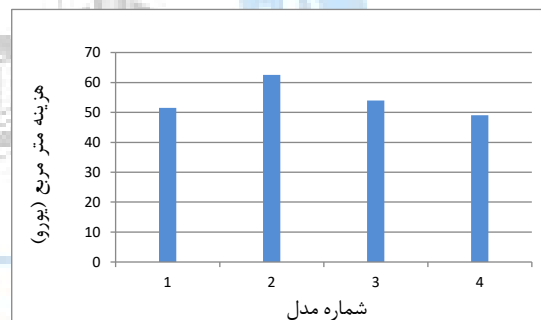
از عوامل تاثیرگذار در انتخاب المان‌های ساختمانی، هزینه تمام شده کل پروژه می‌باشد. هزینه نهایی مدل‌های تحلیلی یاد شده در بالا با منظور کردن هزینه‌های موارد زیر محاسبه شده است:

- اسکلت (شامل میلگردها، قالب‌بندی و بتن‌ریزی)
- سقف
- دیوارهای جداکننده داخلی
- دیوارهای خارجی

نتایج مقایسه‌ها در نمودارهای مربوط به شکل‌های ۵ و ۶ ارائه گردیده است.



شکل ۶: نمودار هزینه نهایی اسکلت و سفت‌کاری ساختمان‌های بتنی در مدل‌های مختلف (بر حسب یورو).



شکل ۵: نمودار هزینه نهایی هر متر مربع ساختمان‌های بتنی در مدل‌های مختلف (بر حسب یورو).

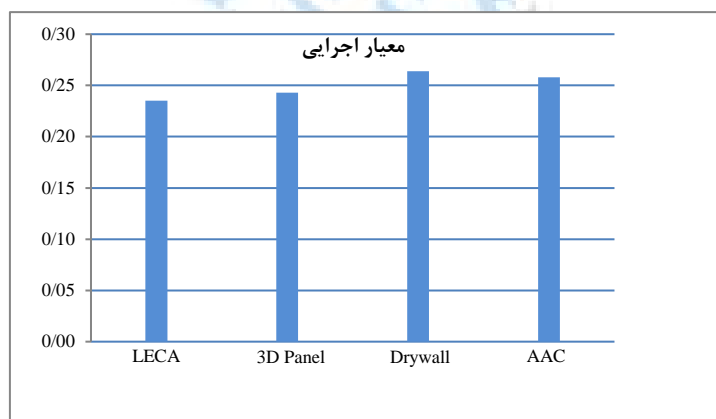
۳-۱-۳ معیارهای اجرایی

به منظور شناسایی زیرمعیارهای اجرایی تاثیرگذار در انتخاب دیوارهای غیربرابر از سوابق مطالعاتی موجود و تجربیات متخصصان این امر استفاده و در نهایت ساختار معیار و زیرمعیارهای اجرایی به صورت جدول ۳ درآمده است. برای تعیین وزن زیرمعیارها نسبت به هدف و همچنین گزینه‌ها نسبت به زیرمعیارهای اجرایی، از تصمیم‌گیرندگان خواسته شده تا در قالب ماتریس‌های مقایسات زوجی به مقایسه اجزای مدل بپردازند. در مرحله بعد با استفاده از نرم افزار Expert Choice^{۱۱} ابتدا عملیات نرمال‌سازی به روش نرم ساعتی بر روی مقایسه گزینه‌ها در برابر زیرمعیارهای اجرایی انجام شده و بردار وزن گزینه‌ها به روش میانگین حسابی به دست آمده و سپس امتیاز هر یک از گزینه‌ها در برابر زیرمعیارها با رعایت وزن نسبی زیر معیارها به دست آمده است. هر یک از ماتریس‌های مقایسات زوجی از نظر سازگاری و ناسازگاری به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۳: زیرمعیارهای انتخاب شده برای معیار اجرایی

| معیار | زیر معیارها |
|--------|--|
| اجرایی | مقاومت در برابر حریق |
| | مقاومت در برابر صوت |
| | مقاومت در برابر رطوبت |
| | ترک خوردگی |
| | وزن در متر مربع |
| | مقاومت در برابر زلزله |
| | اتصال مناسب به سازه |
| | سهولت کنترل کیفی |
| | سادگی اجرای نازک کاری |
| | وابستگی عملیات به عوامل انسانی متخصص |
| | امکان تنوع در طرح معماری |
| | سازگاری با المان‌های غیرسازه‌ای (تأسیسات برقی و مکانیکی) |
| | مقاومت در برابر زلزله |
| | قابلیت ایجاد تغییرات بعدی |
| | کم بودن مراحل اجرایی |

پس از تعیین زیرمعیارهای اجرایی، جهت مقایسه دیوارها در برابر معیار اجرایی نظرات خبرگان این امر جمع‌آوری و برای تعیین وزن زیرمعیارها نسبت به هدف و همچنین گزینه‌ها نسبت به زیرمعیارهای اجرایی، از تصمیم‌گیرندگان خواسته شده تا در قالب ماتریس‌های مقایسات زوجی به مقایسه اجزای مدل پردازند. در مرحله بعدی نتایج حاصله در نرم افزار Expert Choice^۱ وارد شده است و پس از عملیات نرمال‌سازی به روش نرم ساعتی بر روی مقایسه گزینه‌ها در برابر زیرمعیارهای اجرایی، بردار وزن گزینه‌ها به روش میانگین حسابی به دست آمده و سپس امتیاز هر یک از گزینه‌ها در برابر زیرمعیارها با رعایت وزن نسبی زیرمعیارها محاسبه گردیده است. هر یک از ماتریس‌های مقایسات زوجی از نظر سازگاری و ناسازگاری به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به معیار اجرایی به دست می‌آید (شکل ۷).



شکل ۷: امتیازگزینه‌ها بر اساس معیار اجرایی

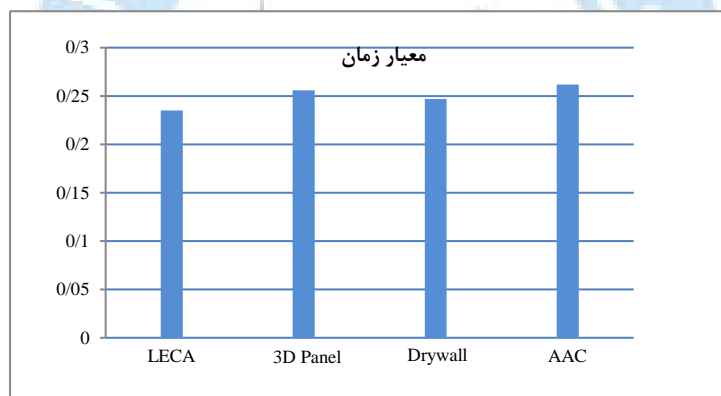
۳-۱-۴ معیار زمان

به منظور شناسایی معیارهای زمان تاثیرگذار در انتخاب دیوارهای غیرباربر در ساختمان‌ها از منابع مختلف و تجربیات خبرگان این امر استفاده و در نهایت ساختار معیار و زیر معیارهای زمان به صورت جدول ۴ درآمده است.

جدول ۴: زیرمعیارهای انتخاب شده برای معیار زمان

| معیار | زیر معیارها |
|-------|--|
| زمان | قابلیت موازی کردن فعالیتها |
| | میزان عملیات اجرایی برای فراوری مواد و مصالح کارگاهی |
| | وابستگی به ابزارها و امکانات کمکی اجرا و نصب |
| | محدودیت فصلی در روش اجرا |
| | کم بودن مراحل اجرایی |
| | میزان پیش ساختگی |

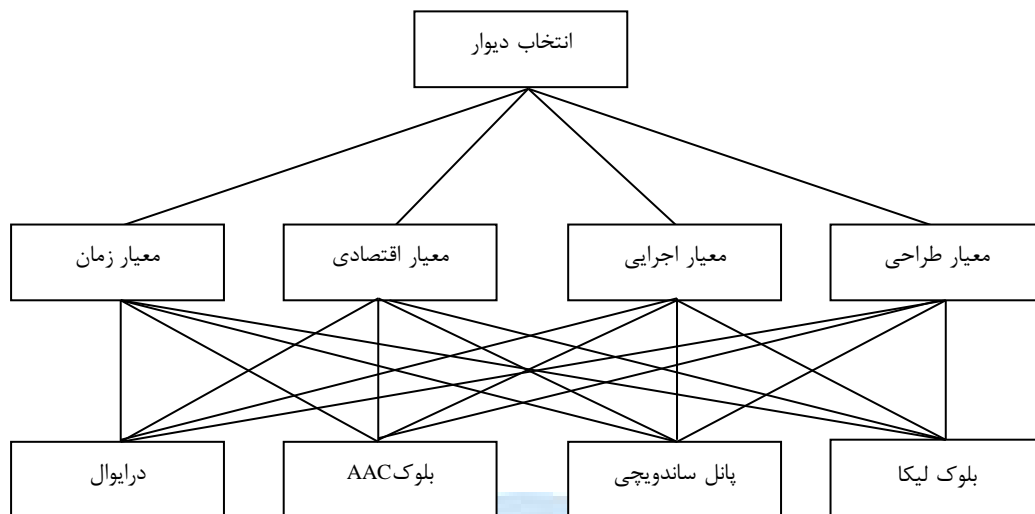
پس از تعیین زیرمعیارهای زمان، جهت مقایسه دیوارها در برابر معیار زمان پس جمع‌آوری اطلاعات، مقایسه زوجی گزینه‌ها را نسبت به زیرمعیارها در نرم افزار ۱۱ Expert Choice وارد کرده و وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به معیار زمان به دست آمده است (شکل ۸). هر یک از ماتریس‌های مقایسات زوجی از نظر سازگاری و ناسازگاری به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۸: امتیاز گزینه‌ها بر اساس معیار زمان

۳-۲ ایجاد درخت سلسله مراتبی

مرحله بعدی در تحلیل سلسله مراتبی تعیین ارتباط بین گزینه‌ها، شاخص‌ها و هدف است که در نهایت درخت سلسله مراتبی ساخته شده است. در رأس درخت سلسله مراتب هدف، سپس معیارها و در نهایت گزینه‌ها قرار گرفته است (شکل ۹).



شکل ۸: درخت سلسله مراتبی ایجاد شده در مدل AHP

۳-۳ مقایسات زوجی

در این مرحله به مقایسه زوجی معیارها نسبت به هدف پرداخته شده است. اساس کار فرآیند تحلیل سلسله مراتبی را مقایسه‌های زوجی تشکیل می‌دهند [۱۹]. معیارها بر اساس هدف دو به دو با هم مقایسه و جهت امتیازدهی از مقیاس استاندارد مقایسات زوجی استفاده و برای هر معیار، یک جدول تکمیل گردیده است. پس از آن ماتریس مقایسات زوجی تشکیل گردیده که مقدار هر عنصر ماتریس مقایسه زوجی، بیانگر درجه اهمیت معیار سطر نسبت به معیار ستون است. در نهایت جهت مقایسه متعادل، معیارها وزن‌دهی شده‌اند. برای وزن‌دهی معیارها ابتدا عناصر هر ستون از ماتریس با تقسیم بر جمع ستون، نرمال شده سپس میانگین حسابی مقادیر نرمال شده در هر سطر به عنوان وزن هر معیار در نظر گرفته شده است. جهت مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیار، مشابه مرحله قبل با استفاده از مقیاس استاندارد مقایسات زوجی، گزینه‌های مختلف بر اساس هر یک از معیارها به صورت زوجی مورد مقایسه قرار گرفته و در نهایت ارزش وزنی گزینه‌ها نسبت به معیارها مانند مرحله قبل به دست آمده است. در نهایت امتیاز گزینه‌ها محاسبه می‌گردد که در این مرحله امتیاز نهایی گزینه‌ها از ضرب ماتریس وزن معیارها در ماتریس وزن گزینه‌ها نسبت به معیارها، به دست آمده است که این مقدار، مبنای رتبه‌بندی گزینه‌ها در روش AHP است. ماتریس مقایسه زوجی فقط در صورتی جهت محاسبات قابل اتکا است که سازگار باشد. مقدار نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی معیارهای اصلی و مقایسات زوجی گزینه‌ها محاسبه شده است. این محاسبات، اعتبار و پایایی مقایسات زوجی این تحقیق را اثبات می‌کند.

۴- نتایج تحلیل

پس از جمع‌آوری اطلاعات برای تعیین وزن معیارها نسبت به هدف و همچنین گزینه‌ها نسبت به معیارها، در قالب ماتریس‌های مقایسات زوجی به مقایسه اجزای مدل پرداخته و نتایج حاصله در نرم افزار Expert Choice ۱۱ وارد شده است و پس از عملیات نرمال‌سازی به روش نرم ساعتی بر روی مقایسه معیارها در برابر هدف، ارزش وزنی معیارها که در جدول ۵ آورده شده محاسبه گردیده است.

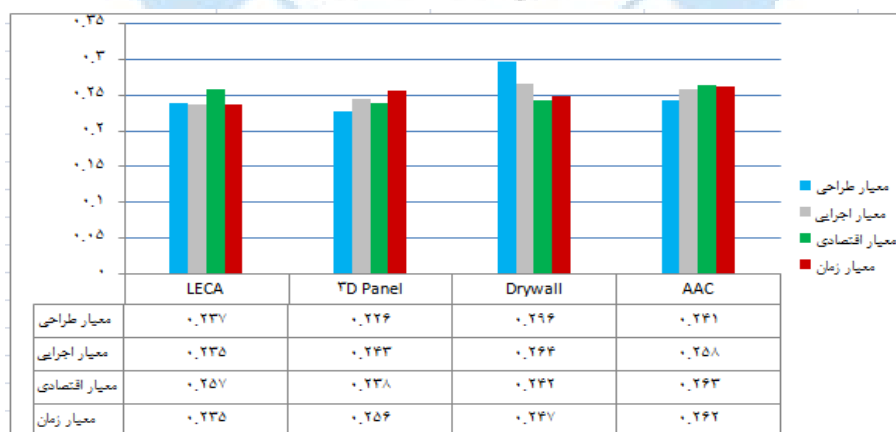
جدول ۵: وزن نسبی معیارها.

| معیارها | وزن نسبی معیارها |
|---------------|------------------|
| معیار طراحی | ۰,۳۶۱ |
| معیار اجرایی | ۰,۳۵۷ |
| معیار اقتصادی | ۰,۱۵۴ |
| زمان | ۰,۱۲۸ |

سپس وزن هر یک از گزینه‌ها در برابر معیارها با رعایت وزن نسبی معیارها محاسبه که نتایج آن در جدول ۶ و شکل ۱۰ آورده شده است.

جدول ۶: وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به معیارها.

| معیار | معیار طراحی | معیار اجرایی | معیار اقتصادی | معیار زمان |
|---|-------------|--------------|---------------|------------|
| بلوک سیمانی با دانه رس منبسط شونده (LECA) | ۰,۲۳۷ | ۰,۲۳۵ | ۰,۲۵۷ | ۰,۲۳۵ |
| پانل ساندویچی (3D-panel) | ۰,۲۲۶ | ۰,۲۴۳ | ۰,۲۳۸ | ۰,۲۵۶ |
| دیوار خشک (Drywall) | ۰,۲۹۶ | ۰,۲۶۴ | ۰,۲۴۲ | ۰,۲۴۷ |
| بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده (AAC) | ۰,۲۴۱ | ۰,۲۵۸ | ۰,۲۶۳ | ۰,۲۶۲ |



شکل ۱۰: نمودار وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به معیارها.

در نهایت از ضرب ماتریس وزن معیارها در ماتریس وزن گزینه‌ها، امتیاز نهایی گزینه‌ها نسبت به معیارها حاصل گردیده است که مبنای رتبه‌بندی گزینه‌ها در روش AHP می‌باشد (جدول ۷). نتایج حاصل از تحلیل بیانگر آن است که در جهت حصول یک سازه ایمن و مقاوم در برابر زلزله، دیوار خشک (Drywall) به عنوان بهترین گزینه و بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده (AAC) دومین ارجحیت و همچنین گزینه‌های رس منبسط شونده (LECA) و پانل ساندویچی (3D-panel) به ترتیب به عنوان گزینه‌های بعدی انتخاب شده است.

$$\begin{bmatrix} 0.237 & 0.235 & 0.257 & 0.235 \\ 0.226 & 0.243 & 0.238 & 0.256 \\ 0.296 & 0.264 & 0.242 & 0.247 \\ 0.241 & 0.258 & 0.263 & 0.262 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.361 \\ 0.357 \\ 0.154 \\ 0.128 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.23911 \\ 0.237757 \\ 0.269988 \\ 0.253145 \end{bmatrix}$$

جدول ۷: امتیاز نهایی دیوارهای غیربرابر و رتبه‌بندی.

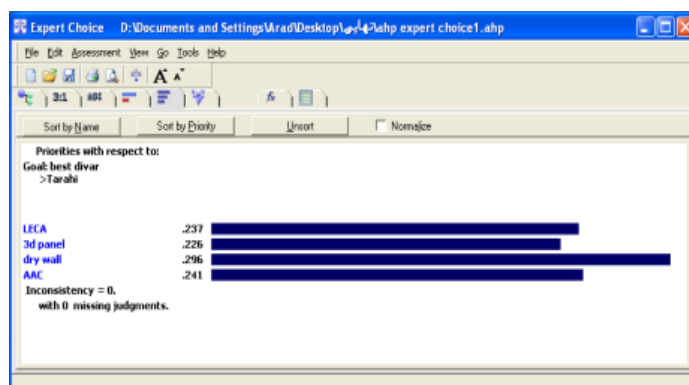
| گزینه‌ها | امتیاز گزینه‌ها | رتبه |
|---|-----------------|------|
| دیوار خشک (Drywall) | ۰.۲۶۹۹۸۸ | ۱ |
| بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده (AAC) | ۰.۲۵۳۱۴۵ | ۲ |
| بلوک سیمانی با دانه رس منبسط شونده (LECA) | ۰.۲۳۹۱۱ | ۳ |
| پانل ساندویچی (3D-panel) | ۰.۲۳۷۷۵۷ | ۴ |

جهت کاربردی بودن ماتریس مقایسات زوجی در روش AHP، ناسازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی نباید از ۱۰٪ بیشتر باشد که این امر در این پژوهش محقق شده است (جدول ۸).

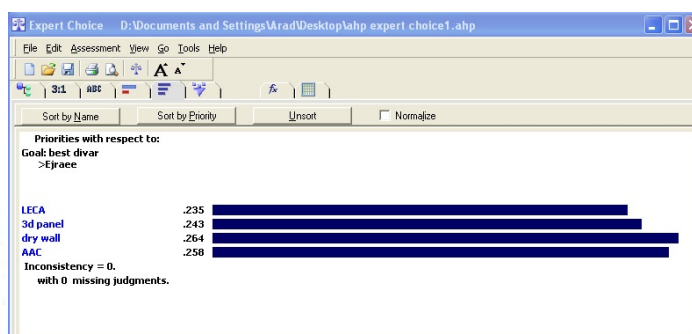
جدول ۸: ضریب ناسازگاری مقایسات زوجی.

| ضریب ناسازگاری | مقایسه زوجی |
|----------------|--|
| ۰.۰۰۱۲ | مقایسه معیارها |
| ۰.۰۰۳۲ | مقایسه گزینه‌ها از لحاظ معیار طراحی |
| ۰.۰۰۵۴ | مقایسه گزینه‌ها از لحاظ معیار معیار اجرایی |
| ۰.۰۴ | مقایسه گزینه‌ها از لحاظ معیار اقتصادی |
| ۰.۲۵۱ | مقایسه گزینه‌ها از لحاظ معیار زمان |

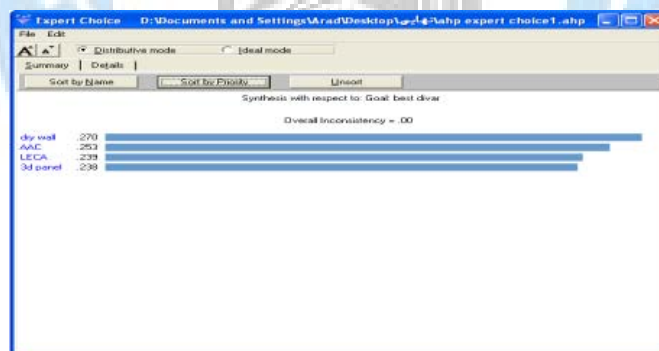
نمودارهای زیر برخی از نتایج حاصل از مقایسات زوجی را نشان می‌دهد که از نرم افزار Expert Choice ۱۱ به دست آمده است (شکل ۹ تا ۱۱).



شکل ۹: امتیازگزینه ها بر اساس معیار طراحی



شکل ۱۰: امتیازگزینه ها بر اساس معیار اجرایی



شکل ۱۱: نتایج نهایی به دست آمده توسط نرم افزار Expert Choice

۵- نتیجه گیری

از آنجایی که دیوارهای جداکننده داخلی یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر وزن سازه می باشد، انتخاب دیوار مناسب برای ساختمان هایی که در مناطق زلزله خیز قرار گرفته اند، بسیار حائز اهمیت است. در این بررسی، معیارهای طراحی، اجرایی، اقتصادی و زمان مورد توجه قرار گرفته و ارزیابی بر اساس روش AHP انجام شده است. از آنجا که هیچ نوع مصالح جهت اجرای دیوار غیرباربر را نمی توان به صورت مطلق به عنوان بهترین گزینه برای همه پروژه ها معرفی و پیشنهاد کرد و در تصمیم گیری برای هر ساختمان، وزن و اهمیت نسبی معیارها با اطلاعات ارائه شده در این تحقیق متفاوت خواهد بود لذا لازم است ارزیابی بر اساس شرایط هر پروژه صورت گیرد. در این تحقیق با توجه به نتایج، تحلیل معیار طراحی به عنوان موثرترین معیار و معیار زمان به عنوان کم اثرترین معیار در تعیین گزینه برتر شناخته شده است.

- ۱- نتایج حاصل از تحلیل بیانگر آن است که در جهت حصول یک سازه ایمن و مقاوم در برابر زلزله، دیوار خشک (Drywall) با امتیاز نهایی ۰,۲۷۰ به عنوان بهترین گزینه و بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده (AAC) با امتیاز نهایی ۰,۲۵۳ دومین ارجحیت و همچنین گزینه‌های رس منبسط شونده (LECA) و پانل ساندویچی (3D-panel) به ترتیب با امتیازهای نهایی ۰,۲۳۹ و ۰,۲۳۸ به عنوان گزینه‌های بعدی انتخاب شده است.
- ۲- با وجود این که دیوار خشک (Drywall) از لحاظ معیارهای اقتصادی و زمان در اولویت قرار نداشت، ولی با توجه به اینکه در این پژوهش، طبق نظر کارفرمایان (با توجه به اهمیت سازه و زلزله‌خیز بودن ایران) معیار طراحی و معیار اجرایی بیشترین اهمیت را دارد و دیوار خشک (Drywall) در دو معیار ذکر شده، بالاترین امتیاز را به خود اختصاص داده، لذا در رتبه اول قرار گرفته است.
- ۳- نظر به این که بهترین گزینه از نظر معیار زمان و هزینه تمام شده، بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده (AAC) است، در پروژه‌هایی که زمان و هزینه اولویت دارد، استفاده از این نوع دیوار پیشنهاد می‌گردد.
- ۴- وزن کم دیوار خشک (Drywall) نسبت به سه دیوار دیگر، موجب کاهش وزن مرده ساختمان و مقدار مصرف میلگرد مصرفی شده و برش پایه نیز کاهش یافته است.
- ۵- با توجه به نتایج طراحی با نرم‌افزار ETABS و نمودارهای مقایسه مدل‌ها، مدل دارای دیوارهای جداکننده از نوع دیوارهای خشک (Drywall)، نسبت سطح مقطع ستون‌ها به سطح پلان، عدد کوچکتری را نسبت به سه دیوار دیگر نشان داده است.
- ۶- از آنجا که فرآیند کمی کردن معیارهای کیفی، در تصمیم‌گیری‌ها بسیار اهمیت دارد روش AHP می‌تواند به عنوان یک فرآیند روتین در طیف وسیعی از پروژه‌های ساختمانی در دستور کار مهندسین مشاور قرار گیرد.

مراجع

- [1] Dhakal, RP. (2010). Damage to Non-structural Components and Contents in 2010 Darfi eld Earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society of Earthquake Engineering*, 43, (4), 404-411.
- [2] Priestley, MJN., Sritharan, S., Conley, JR., Pampanin, S. (1999). Preliminary results and conclusions from The PRESSS five-story precast concrete test building. *PCI Journal*, 44 (6), 42-67. DOI:10.15554/pci.11011999.42.67.
- [3] Federal Emergency Management Agency., (2011). *FEMA E-74 Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage A Practical Guide*. Washington, D.C.
- [4] Fulop, L.A. Dubina, D. (2004). Performance of wall-stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading, part II: numerical modelling and performance analysis. *Thin-Walled Structures*, 42, 339-349. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(03\)00064-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(03)00064-8).
- [5] Kanvinde, A.M. Deierlein, G.G. (2006). Analytical models for the seismic performance of gypsum drywall partitions. *Earthquake Spectra*, 22, 391-411. <https://doi.org/10.1193/1.2191927>
- [6] Restrepo, J.I. Lang, A.F. (2011). Study of loading protocols in light-gauge stud partition walls. *Earthquake Spectra*, 27, 1169-1185. <https://doi.org/10.1193/1.3651608>
- [7] Kanvinde, A.M. Deierlein, G.G. (2006). Analytical models for the seismic performance of gypsum drywall partitions. *Earth Spectra* 22, 391-411. <https://doi.org/10.1193/1.2191927>
- [8] Häupl, P. Fechner, H. Petzold, H. (2004). Interior retrofit of masonry wall to reduce energy and eliminate moisture damage: comparison of modeling and field performance. In: *Thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings IX*. Atlanta: GA: ASHRAE, 1-12.
- [9] Bertolini, M. Braglia, M. (2006). *Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract*. 17 January. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.01.005>.
- [10] Keeny, R.L. Raiffa, H. (1993). *Decision making with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084>.
- [11] Che-Wei, C. Cheng-Ru, W. Chin-Tsai, L. Huang-Chu, C. (2007). An application of AHP and sensitivity analysis for selecting the best slicing machine. *Computer and Industrial Engineering*, 52 (2), 296-307. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.11.006>.
- [12] Kamal, M. Al-Subhi, A.H. (2001) Application of the AHP in project management. *International Journal of project management*, 19, 19-27. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00038-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00038-1)

- [13] Tiwari, M.K. Banerjee, R. (2001). A Decision Support System for the Selection of a Casting process using AHP. *Production Planning and Control*, 12, 689-694. <https://doi.org/10.1080/09537280010016783>
- [14] Tabarak, M.A. William, D. (2003). Artificial neural network for selection of buildable structural systems. *Engineering Construction and Architectural Management Journal*, 10(4), 263-271. <https://doi.org/10.1108/09699980310489979>
- [15] Wong, J. Li, H. Lai, J. (2008). Evaluating the system intelligence of the intelligent building systems. *Automation in Construction*, 17, 284-302. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.06.002>.
- [16] Dağdeviren, M. (2008). Decision Making in Equipment Selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19, 397-406. <https://doi.org/10.1007/s10845-008-0091-7>.
- [17] Y. M.W, Y.L. b and Z. Hua. (2008). On the extent analysis method for fuzzy AHP and its applications. *European Journal of Operational Research*, 186 (2), 735-747. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.050>
- [18] Basak Sener, M Lutfi Suzen and V. Doyura. (2006). Landfill site selection by using geographic information system. *Environmental Geology*, 49 (3), 376-388.
- [19] Al-Harbi, K.M.A.-S. (2001). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, 19, 19- 27.
- [20] Saaty, T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
- [21] Amiri, M.P. (2010). Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. *xpert Systems with Applications*, 37 (9), 6218-6224. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.103>.
- [22] Duen-Ren Liua and Y.-Y. Shih. (2005). Integrating AHP and data mining for product recommendation based on customer lifetime value. *Information & Management*, 42 (3), 387-400. <https://doi.org/10.1016/j.im.2004.01.008>.
- [23] Semih Onut and S. Soner. (2011). Transshipment site selection using the AHP and TOPSIS approaches under fuzzy environment. *Waste Management*, 28(9), 1552-1559. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.05.019>.

