

مقایسه بین بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده و بلوک ماسه سیمانی و ارزیابی تأثیر آن دو از نظر زمان، هزینه، ایمنی، کیفیت و توسعه پایدار با استفاده از تصمیم گیری چندمعیاره

سپهر حسینی درخشنده^۱، محمدامین کهنسال^۲، امیرمحمد رمضان پور^۳، حسین تقدس^۴
۱-۲ دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران
تهران

۳-۴ دانشیار، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

ramezani@ut.ac.ir

خلاصه

این مقاله به بررسی دو نوع مصالح ساختمانی متداول، بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده (AAC) و بلوک ماسه سیمانی می‌پردازد تا تأثیر آن‌ها را از جنبه‌های مختلفی چون زمان، هزینه، ایمنی، کیفیت و توسعه پایدار بر پروژه‌های ساختمانی مورد ارزیابی قرار دهد. رویکرد مورد استفاده در این مقاله، تصمیم‌گیری چندمعیاره (AHP) می‌باشد که به وسیله یک پرسشنامه، اطلاعات مورد نیاز از خبرگان صنعت جمع‌آوری شده و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice، نتایج تحلیل شدند. این مطالعه به دنبال تسهیل فرآیند انتخاب مصالح ساختمانی برای پروژه‌های معمول ساخت و ساز شهری و پیشبرد توسعه پایدار در صنعت ساخت و ساز است و نتایج نشان می‌دهد که بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) بر اساس معیارهای تعیین شده از برتری نسبی برخوردار است. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که از نظر معیارهای توسعه پایدار، ایمنی و کیفیت بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) مناسب‌تر از بلوک ماسه سیمان می‌باشد، اما از نظر معیار هزینه بلوک ماسه سیمان مناسب‌تر می‌باشد. این مقاله با ارائه دیدگاه‌های علمی و عملی، به دینفعان این امکان را می‌دهد که انتخاب‌های آگاهانه‌تری داشته باشند و بتوانند نتایج مطلوب‌تری را در پروژه‌های خود به دست آورند.

کلمات کلیدی: توسعه پایدار، AHP، بلوک بتنی هوادهی اتوکلاو شده (AAC)، بلوک ماسه سیمان

۱. مقدمه

در مهندسی عمران و مدیریت ساخت و ساز، انتخاب مصالح ساختمانی یک عامل حیاتی است که به طور قابل توجهی بر نتایج پروژه از نظر هزینه، زمان، ایمنی، کیفیت و پایداری تأثیر می‌گذارد. پیشرفتی که در علم مواد در سال‌های اخیر شده است، منجر به توسعه بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) و بلوک های ماسه سیمانی شده است که هر کدام مزایا و محدودیت های خود را دارند. بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) که به دلیل ویژگی های وزن سبک و عایق بودن شناخته می شود، به عنوان یک جایگزین پایدار برای مصالح ساختمانی سنتی ظهور کرده است که نویدبخش عملکرد محیطی بهبود یافته و کاهش بارهای سازه ای است و در نتیجه خطرات زلزله را به حداقل می رساند [۱]. از سوی دیگر، بلوک های ماسه سیمانی که به دلیل استحکام و در دسترس بودن به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند، با تلاش های مستمر برای کاهش وزن آن ها برای افزایش ایمنی و کارایی، یکی از پایه های اصلی در ساخت و ساز، به ویژه در مناطق مستعد لرزه خیز بوده اند [۲].

اثرات زیست محیطی مصالح ساختمانی به دلیل افزایش نگرانی ها در مورد گرمایش جهانی و پایداری توجه بی سابقه ای را به خود جلب کرده است. در این زمینه، بلوک های بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) که توسط یک معمار سوئدی با نام تجاری هبل به جامعه جهانی معرفی شده اند، یک گزینه ساخت و ساز سازگار با محیط زیست را ارائه می دهند. بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) که از مخلوطی از سیلیس، سیمان، آهک و پودر آلومینیوم ساخته شده است، تحت یک فرآیند پخت در اتوکلاوها تحت دما و فشار بالا قرار می گیرد که منجر به یک ماده سبک وزن، عایق حرارتی و صوتی می شود [۳]. استاندارد ملی ایران الزامات خاصی را برای بلوک های بتنی هوادهی اتوکلاو شده (AAC) تعیین می کند تا اطمینان حاصل شود که حداقل کیفیت های ضروری برای استفاده در ساخت و ساز را برآورده می کنند.

مطالعات تطبیقی و تصمیم گیری در انتخاب مصالح به طور فزاینده ای از روش های تصمیم گیری چند معیاره (MCDM) مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای تسهیل ارزیابی سیستماتیک گزینه ها بر اساس معیارهای چندگانه استفاده می کنند [۴]. این روش ها یک رویکرد ساختاریافته برای

ارزیابی جنبه‌های مختلف مصالح ساختمانی، از جمله هزینه، عملکرد، اثرات زیست‌محیطی، و ایمنی ارائه می‌دهند و ذینفعان را قادر می‌سازند تا انتخاب‌های آگاهانه‌ای همسو با اهداف پروژه و اهداف پایداری داشته باشند.

گذار به سمت شیوه‌های ساختمانی پایدار مستلزم درک جامعی از اثرات چرخه عمر مواد است و از پذیرش موادی مانند بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) که تعادلی بین کارایی عملیاتی و نظارت بر محیط‌زیست ارائه می‌کند، حمایت می‌کند [۵]. با ادغام مواد پیشرفته و تکنیک‌های ساخت و ساز نوآورانه، صنعت می‌تواند چالش‌های مبرم مصرف انرژی، انتشار کربن و کاهش منابع را برطرف کند و راه را برای آینده‌ای پایدارتر در ساخت و ساز هموار کند.

ضرورت این تحقیق بر نیاز مبرم به تقویت شیوه‌های ساخت و ساز برای بهبود پایداری، کارایی هزینه، ایمنی و کیفیت استوار است. صنعت ساخت و ساز نقش مهمی در اقتصاد جهانی ایفا می‌کند، با اینحال منجر به تخریب محیط زیست و کاهش منابع آن می‌گردد. با افزایش آگاهی جهانی از مسائل زیست محیطی و پایداری، فشار بر روی این صنعت برای اتخاذ شیوه‌ها و مواد سبزتر بیشتر می‌شود. [۳] بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) به عنوان یک جایگزین پایدار برای موارد سنتی تر می‌باشد و مزایایی مانند کاهش وزن، افزایش عایق حرارتی و صوتی و اثرات زیست محیطی کمتر را ارائه می‌دهد [۱].

این تحقیق با استفاده از یک رویکرد سیستماتیک تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)، به ویژه فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، برای ارزیابی بلوک بتنی هوادهی اتوکلاو شده (AAC) در برابر بلوک‌های ماسه سیمانی به این زمینه کمک می‌کند. این مطالعه با ادغام نظرات کارشناسان و تجزیه و تحلیل کمی، ارزیابی جامعی از مواد را با در نظر گرفتن نه تنها تأثیرات زیست محیطی آنها، بلکه عواملی مانند هزینه، کیفیت و ایمنی ارائه می‌دهد. چنین رویکردی برای پیشبرد شیوه‌های ساخت و ساز پایدار بسیار مهم است و صنعت را قادر می‌سازد تا تصمیمات آگاهانه‌ای اتخاذ کند که هم با اهداف اقتصادی و هم با اهداف زیست محیطی هماهنگ باشد. در نهایت، این تحقیق شکاف بین دانش نظری و کاربرد عملی در انتخاب مواد را پر می‌کند و به صنعت ساخت‌وساز پایدارتر، کارآمدتر و ایمن‌تر را کمک می‌کند.

۲. مرور ادبیات و مطالعات پیشین

در این بخش به بررسی مقالات معتبر کنفرانسی، ژورنالی، کتب و سایر اسناد پرداخته می‌شود و هدف از این کار، بررسی کارهای علمی انجام شده و همچنین یافتن خلأهای علمی موجود می‌باشد تا با یک جهت مناسب پژوهش را ادامه داد. در ادامه، خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده پیرامون موضوع، در سه بخش بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده (AAC)، بلوک ماسه سیمان و روش تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) بسط داده شده است.

۱.۲ بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده (AAC)

بلوک بتنی هوادار اتوکلاو شده^۱ نوعی از بلوک‌های در حال استفاده در صنعت ساختمان می‌باشند که مزیت اصلی آنها سبک و عایق بهتر حرارتی و صوتی بودن می‌باشد. این بلوک در اروپا با نام تجاری هبلکس^۲ شناخته می‌شود و توسط مهندس معمار سوئدی به جامعه جهانی معرفی شد [۱]. این بتن مخلوطی از سیلیس، سیمان، آهک و پودر آلومینیوم می‌باشد که در کوره‌های اتوکلاو و در درجه حرارت ۲۰۰ درجه سانتی گراد و فشار ۱۲ اتمسفر پخته می‌شود [۱].

به سه طریق می‌توان این بلوک‌ها را تولید کرد، استفاده از مواد شیمیایی گازساز، استفاده از سنگدانه سبک یا استفاده از بتن بدون سنگدانه [۳]. یکی از مشکلاتی که این نوع بلوک‌ها دارند، ترک خوردن آنها حین اجرا می‌باشد. این مشکل را تا حدودی با عوض کردن نحوه ساخت آنها، یعنی تولید به روش غیر اتوکلاوی برطرف می‌گردد [۳]. استاندارد ملی ایران ویژگی‌های خاصی را برای این بلوک‌ها در نظر گرفته است که باید بلوک‌های ساخته شده، این الزامات حداقلی را داشته باشند.

۲.۲ بلوک ماسه سیمان

بلوک ماسه سیمان در کل یکی از مصالح مورد استفاده برای ساخت دیوار در صنعت ساختمان است که با توجه به نوع دیوار مورد نظر از انواع مختلف آن استفاده می‌شود [۶]. اجزای تشکیل دهنده این بلوک ها عمدتاً ماسه آب و سیمان می باشند که در ابعاد مختلف با توجه به تقاضای بازار تولید می

¹ Autoclaved Aerated Concrete Blocks

² Heblux

شوند. اکثر سیمان هایی که در ساخت این بلوک ها مورد استفاده قرار می گیرد از نوع سیمان های پرتلند، سیمان سفید، سیمان پوزولانی و سیمان آهکی می باشند [۶].

همچنین با توجه به زلزله خیز بودن کشور ایران و این که در بسیاری از ساخت و ساز ها از بلوک های سیمانی به عنوان تیغه و دیوار استفاده می شود، سعی بر آن است که وزن این بلوک ها کاهش یابد تا در نتیجه وزن کلی ساختمان بطور چشمگیری کاهش پیدا کند. از این رو روش های متفاوتی برای سبک سازی بلوک ها وجود دارد که از جمله آن ها می توان به موارد زیر اشاره کرد [۲].

- ۱- استفاده از سنگدانه های متخلخل با وزن مخصوص ظاهری کمتر به جای سنگدانه های متداول
- ۲- ایجاد حباب در داخل ملات هنگام ساخت بلوک
- ۳- کاهش و یا حذف سنگدانه های سبک از طرح اختلاط

۳.۲ روش تصمیم گیری چند معیاره (MCDM)

یکی از ساده ترین تعریف های تصمیم گیری، انتخاب بین چند "گزینه" با توجه به معیار های مختلف است [۴] (اصغریور، ۱۳۷۷). ویژگی مشترکی که مدل های تصمیم گیری چند معیاره دارند تسهیل فرایند تصمیم گیری است. این مدل ها با انجام محاسبات ریاضی و در نظر گرفتن نظرات تصمیم گیرندگان گزیدار های مختلف را با هم مقایسه کرده و بهترین آن ها را ارائه می کنند [۴].

مدل های تصمیم گیری چندمعیاره به طور کل شامل دو دسته اصلی چند شاخصه و چند هدفه هستند. در مدل های تصمیم گیری چندهدفه، چندین هدف به طور همزمان برای بهینه شدن بررسی می شوند در حالیکه در مدل های چندشاخصه، مینا، انتخاب بهترین و در عین حال مناسب ترین گزینه از بین گزینه های مختلف است [۴]. همچنین "فرآیند تحلیلی سلسله مراتبی یا به طور اختصار AHP، روشی برای تبدیل ارزیابی های ذهنی اهمیت های نسبی به مجموعه ای از وزن ها است (ساعتی، ۱۹۷۷ و ۱۹۸۲: آر دبلیو ساعتی، ۱۹۸۷)" [۷]. ثابت شده است برای مسائلی که در آن باید بین چند گزینه محدود، گزینه مناسبی انتخاب شود این روش، روش مناسبی می باشد [۸].

۳. روش تحقیق

در این پژوهش از تکنیک های مصاحبه و پرسش نامه جهت جمع آوری داده ها استفاده شده است. در طول فرآیند انجام پژوهش، چندین جلسه با خبرگان صنعت ساختمان گذاشته شد و اطلاعاتی در زمینه کاربرد و تفاوت های دو بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) و ماسه سیمان کسب شد. همچنین، پرسشنامه ای که در فرآیند AHP استفاده می شود، ابزاری استاندارد جهت مشخص کردن وزن معیارها و گزینه ها براساس مقایسه زوجی می باشد که توسط ساعتی ارائه گردیده است. در این پرسشنامه پاسخ دهندگان با استفاده از ۹ طیف جدول ۱، که توسط ساعتی در سال ۲۰۰۸ ارائه شده است؛ اقدام به مقایسه دو به دوی معیار ها می کنند.

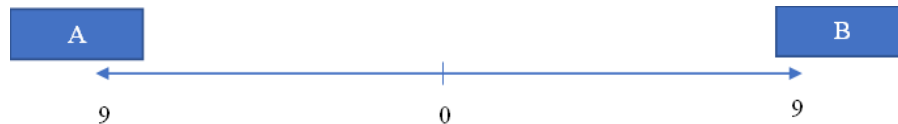
جدول ۱- مقایسه بنیادی اعداد مطلق

مقدار عددی	درجه اهمیت	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
۱	Equal Importance	اهمیت یکسان
۲	Weak or Slight	اهمیت ضعیف یا کم
۳	Moderate Importance	اهمیت متوسط
۴	Moderate Plus	بالتر از اهمیت متوسط
۵	Strong Importance	اهمیت قوی
۶	Strong Plus	بالتر از اهمیت قوی
۷	Very Strong	اهمیت بسیار قوی
۸	Very, very Strong	اهمیت بسیار، بسیار قوی
۹	Extreme Important	اهمیت بی اندازه

در شکل ۱، خبرگان برای مقایسه دو معیار A و B به آن‌ها در مقیاس ۱ تا ۹ امتیاز می‌دهند بدین صورت که مثلاً هرچه اهمیت معیار B از A بیشتر باشد، امتیازی بین ۱ تا ۹ در سمت راست نمودار پیکانی به آن داده می‌شود. مثلاً اگر شماره ۵ در سمت راست پیکان انتخاب شود، یعنی عنصر B، ۵ برابر مهمتر از عنصر A است [۹]. این فرآیند برای دو به دو همه معیارها و زیرمعیارها تکرار می‌شود. برای محاسبه تعداد مقایسات زوجی از رابطه ساده آماري استفاده می‌شود که برابر تعداد جایگشت‌های غیر تکراری معیارها می‌باشد، که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۰].

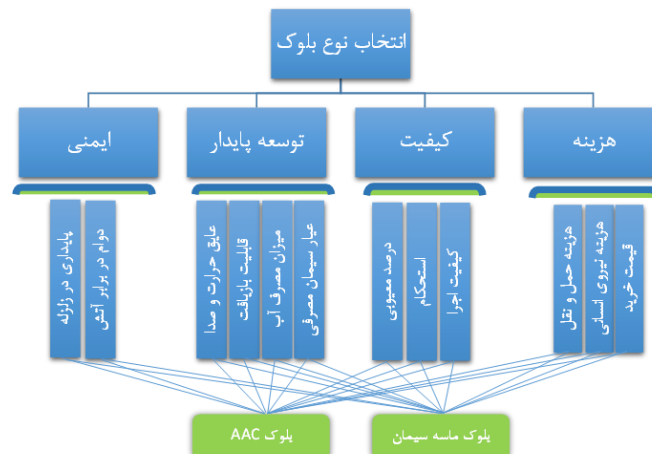
$$\binom{n}{2} = \frac{n \times (n-1)}{2} \quad (1)$$

که در آن، n تعداد معیارها می‌باشد.



شکل ۱- مقایسه زوجی دو معیار A و B

حال برای انجام تحلیل سلسله مراتبی، معیارهای اصلی که در نظر گرفته شدند، عبارتند از: هزینه، زمان، کیفیت، توسعه پایدار و ایمنی. همچنین با همفکری و مشورت با افراد دارای تجربه، برای هر معیار، یکسری زیرمعیار تعریف شده است. معیارهای اصلی شامل هزینه، کیفیت، توسعه پایدار و ایمنی می‌باشند. زیرمعیارهای معیار هزینه شامل هزینه حمل و نقل، هزینه نیروی انسانی و قیمت خرید می‌باشند. زیرمعیارهای معیار کیفیت شامل کیفیت اجرا (منظور سهولت و سرعت اجرا)، استحکام (منظور معیارهای فنی نظیر مقاومت فشاری، دوام در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد، جمع‌شدگی و ... (مطابقت با استانداردها))، درصد معیوبی هنگام تحویل در کارگاه می‌باشند. زیرمعیارهای معیار توسعه پایدار شامل عیار سیمان مصرفی، میزان مصرف آب، قابلیت بازیافت و عایق حرارت و صدا می‌باشند. در شکل ۲، سلسله مراتب این پژوهش قابل مشاهده می‌باشد.



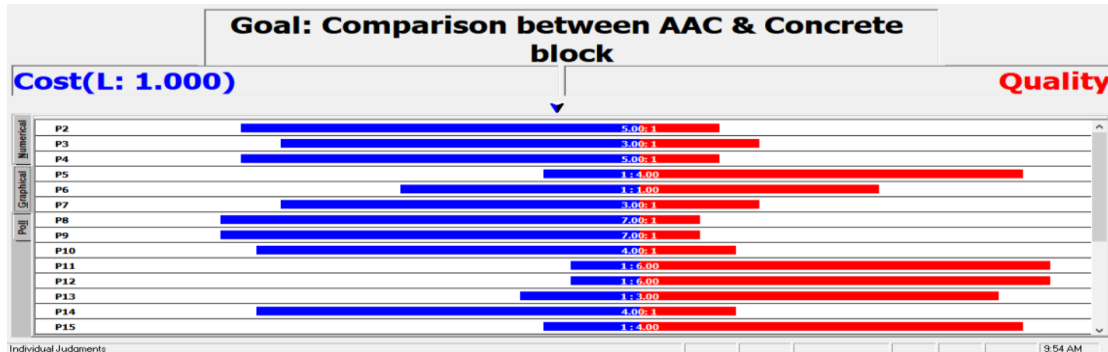
شکل ۲- سلسله مراتب پژوهش مقایسه بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) و ماسه سیمان

پرسشنامه استفاده شده در سه بخش تدوین شده است. در قسمت اول معیارهای پژوهش با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در قسمت دوم، بر اساس هر معیار، زیرمعیارهای آن بخش با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در بخش بعدی، گزیده‌ها (بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) یا ماسه سیمان) بر اساس تمامی زیرمعیارها مقایسه دو به دو می‌شوند. پرسش نامه ذکر شده با استفاده از سامانه پرسال (Porsall) تدوین شده است و برای افرادی که تجربه کارهای اجرایی دارند ارسال شده است. در نهایت پس از تکمیل پرسشنامه با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice اقدام به تحلیل نتایج شد.

۴. بحث و تفسیر نتایج

در این پژوهش پرسش‌نامه فوق به چند نفر افراد دارای تجربه کار با این بلوک‌ها داده شده است و از آن‌ها خواسته شد تا آن را با همکارانشان نیز به اشتراک بگذارند. این پرسش‌نامه به کمک سایت porsall.com طراحی و به دست آن‌ها رسید. از میان ۲۹ پاسخ دریافت شده، ۲۵ مورد از آن‌ها مورد قبول بود.

در نهایت با استفاده از این ۲۵ پاسخ، اقدام به ورود داده‌ها به نرم‌افزار و سپس تحلیل آن‌ها شد. در شکل ۳، نتیجه پاسخ افراد شرکت کننده برای مقایسه دو معیار هزینه و کیفیت از نرم‌افزار آورده شده است.



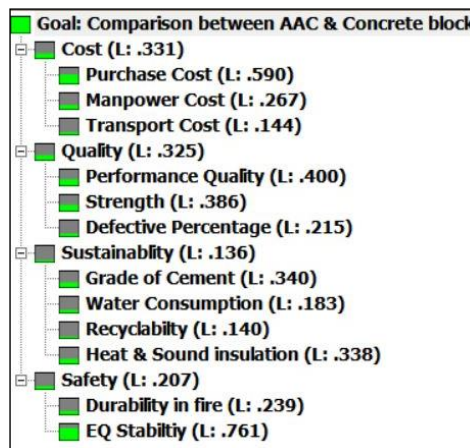
شکل ۳- نمودار هیستوگرامی پاسخ شرکت کنندگان برای دو معیار هزینه و کیفیت

پس از وارد کردن داده‌ها، نرم‌افزار با استفاده از الگوریتم مقایسه‌ای AHP خود، نتایج را در قالب ماتریس‌های وزن داده شده تصمیم‌گیری به همراه نرخ ناسازگاری هریک، نمودارهای حساسیت و اولویت بلوک‌ها را با توجه به هریک از معیارها و زیر معیارها ارائه می‌کند. لازم به ذکر است که نتایج آورده شده برآیندی از تمام پاسخ‌ها می‌باشند. در ادامه هر یک از بخش‌های ذکر شده را به تفکیک ارائه می‌شوند. نمودارهای میله‌ای که در سمت چپ ماتریس وجود دارند، نشان‌دهنده اهمیت نسبی موارد مقایسه شده می‌باشند. به عنوان مثال در شکل ۴، زیرمعیار کیفیت اجرا از اهمیت بیشتری نسبت به استحکام و درصد معیوبی در فرآیند انتخاب نوع بلوک برخوردار می‌باشد.

Compare the relative importance with respect to: Quality			
	Performance Quality	Strength	Defective Percentage
Performance Quality		1.13354	1.70289
Strength			1.96535
Defective Percentage		Incon: 0.01	

شکل ۴- ماتریس تصمیم‌گیری با توجه به معیار کیفیت

در ادامه اهمیت نسبی بلوک‌ها با توجه به معیارها و زیرمعیارها ارائه شده است. در شکل ۵ مجموع اهمیت معیارهای اصلی برابر ۱ می‌باشد که به نسبت مشخص شده بین معیارها توزیع شده است، همچنین مجموع اهمیت زیرمعیارهای در هر معیار برابر ۱ می‌باشد، که به نسبت مشخص شده توزیع شده‌اند. همانطور که مشخص است، معیار هزینه با اهمیت نسبی ۳۳.۱٪ از بیشترین اهمیت و معیار توسعه پایدار با اهمیت نسبی ۱۳.۶٪ از کمترین اهمیت در نظر پاسخ‌دهندگان قرار دارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که زیرمعیارهای هزینه خرید، کیفیت اجرا، عیار سیمان مصرفی و پایداری در زلزله از مهمترین زیرمعیارها می‌باشند.



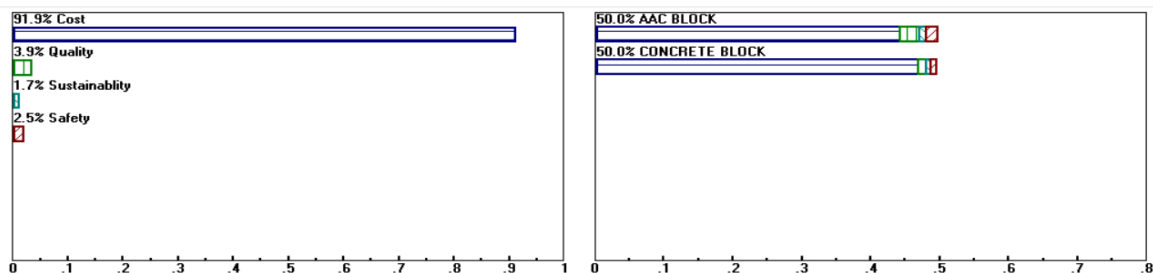
شکل ۵- اهمیت نسبی معیارها و زیرمعیارها

نرم افزار، نتیجه مقایسه دو بلوک با توجه به هر معیار و زیر معیار را نیز ارائه می کند. در تمامی ۴ معیار اصلی، بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) از اولویت بیشتری برخوردار است به جز معیار هزینه. در زیرمعیار هزینه خرید و مصرف آب، بلوک ماسه سیمان از اولویت بیشتری برخوردار و در سایر زیر معیارها (هزینه حمل و نقل، هزینه افراد، کیفیت اجرا، عایق حرارت و صدا، دوام در آتش، درصد معیوبی، پایداری در زلزله، بازیافت و استحکام) ارجحیت با بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) می باشد. در زیرمعیار عیار سیمان مصرفی، امتیاز دو بلوک بسیار به هم نزدیک و فقط کمی بلوک ماسه سیمان کمتر از بلوک دیگر بود. در ادامه الویت بندی تمامی معیارها و زیرمعیارها از نظر کارشناسان در جدول ۲ آورده شده است. همانطور که در ستون آخر جدول (Prty) مشخص است، هزینه خرید بلوک ماسه سیمان بیشترین و قابلیت بازیافت بلوک ماسه سیمان کمترین توجه پاسخ دهندگان را جلب کرده است.

جدول ۲- اولویت بندی تمامی زیرمعیارها با توجه به گزیدارها

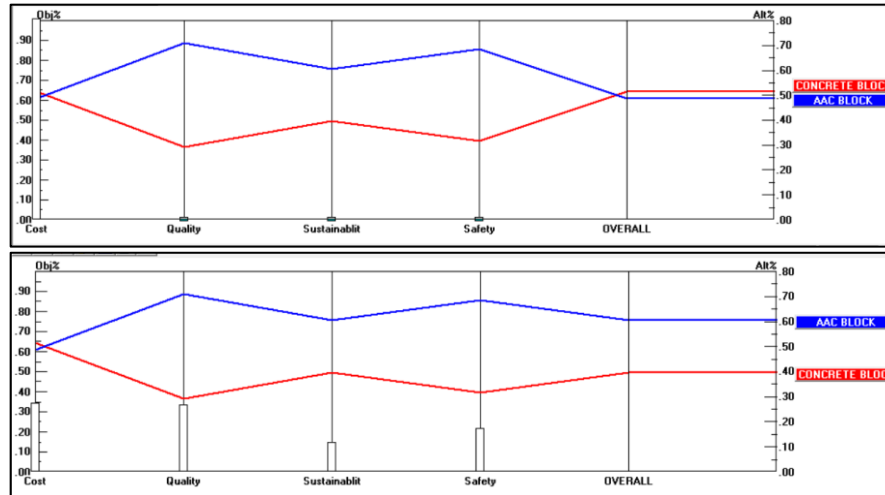
Level 1	Level 2	Alts	Prty
Cost (L: .331)	Purchase Cost (L: .590)	CONCRETE BLOCK	0.123
		AAC BLOCK	0.100
Safety (L: .207)	EQ Stability (L: .761)	AAC BLOCK	0.099
		AAC BLOCK	0.082
Quality (L: .325)	Performance Quality (L: .400)	AAC BLOCK	0.079
		AAC BLOCK	0.055
Cost (L: .331)	Manpower Cost (L: .267)	CONCRETE BLOCK	0.051
		AAC BLOCK	0.044
Quality (L: .325)	Defective Percentage (L: .215)	AAC BLOCK	0.043
		CONCRETE BLOCK	0.031
Safety (L: .207)	EQ Stability (L: .761)	AAC BLOCK	0.030
		CONCRETE BLOCK	0.029
Cost (L: .331)	Transport Cost (L: .144)	AAC BLOCK	0.029
		CONCRETE BLOCK	0.029
Quality (L: .325)	Performance Quality (L: .400)	AAC BLOCK	0.029
		CONCRETE BLOCK	0.029
Sustainability (L: .136)	Grade of Cement (L: .340)	AAC BLOCK	0.029
		CONCRETE BLOCK	0.029
Quality (L: .325)	Heat & Sound insulation (L: .338)	AAC BLOCK	0.028
		CONCRETE BLOCK	0.028
Sustainability (L: .136)	Defective Percentage (L: .215)	CONCRETE BLOCK	0.028
		CONCRETE BLOCK	0.028
Quality (L: .325)	Grade of Cement (L: .340)	CONCRETE BLOCK	0.026
		CONCRETE BLOCK	0.026
Cost (L: .331)	Strength (L: .386)	CONCRETE BLOCK	0.024
		CONCRETE BLOCK	0.024
Safety (L: .207)	Transport Cost (L: .144)	CONCRETE BLOCK	0.017
		CONCRETE BLOCK	0.017
Sustainability (L: .136)	Durability in fire (L: .239)	CONCRETE BLOCK	0.016
		CONCRETE BLOCK	0.016
	Water Consumption (L: .183)	CONCRETE BLOCK	0.015
		AAC BLOCK	0.015
	AAC BLOCK	AAC BLOCK	0.012
		CONCRETE BLOCK	0.012
	Recyclability (L: .140)	CONCRETE BLOCK	0.080
		CONCRETE BLOCK	0.080
	heat & Sound insulation (L: .338)	CONCRETE BLOCK	0.004
		CONCRETE BLOCK	0.004
	Recyclability (L: .140)	CONCRETE BLOCK	0.004
		CONCRETE BLOCK	0.004

در آخرین بخش به تحلیل حساسیت نتایج بدست آمده پرداخته می شود. نرم افزار Expert Choice پنج نوع تحلیل حساسیت ارائه می دهد که شامل تحلیل حساسیت پویا، تحلیل حساسیت کارایی، تحلیل حساسیت گزاردانی، تحلیل حساسیت سربه سر و تحلیل حساسیت دویعدی می باشد. در ادامه به هر کدام خواهیم پرداخت. تحلیل حساسیت پویا برای بررسی تأثیر تغییر اولویت معیارها بر تغییر اولویت گزینه ها می باشد. همانطور که از شکل ۶ مشخص می باشد، با افزایش تأثیر میزان هزینه تا مقدار ۹۱.۹ درصد، وزن های محاسبه شده برای دو بلوک برابر می شوند که بدین معنی می باشد که اگر توزیع تأثیر معیارها به شکل بالا باشند، به حالت تعادلی در انتخاب بلوک ها رسیده می شود، یعنی اگر تأثیر هزینه از این مقدار بیشتر شود بلوک ماسه سیمان، اگر تأثیر هزینه کمتر شود، بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) انتخاب خواهد شد.



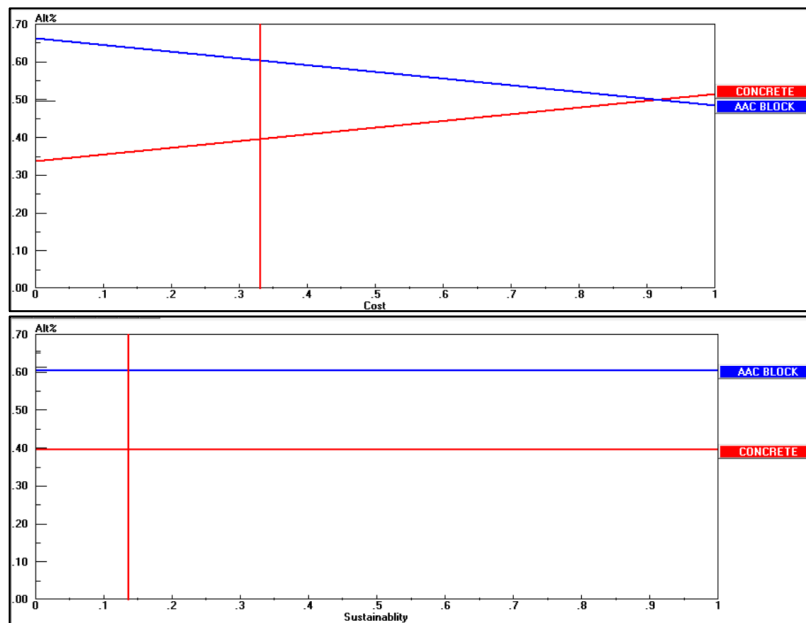
شکل ۶- نمودار تحلیل حساسیت پویا با تغییر معیار هزینه

تحلیل حساسیت کارایی برای نشان دادن چگونگی اولویت بندی گزینه‌های مختلف نسبت به یکدیگر در خصوص هر معیار و همچنین مجموع معیارها می‌باشد. با توجه به شکل ۷، اگر فقط معیار هزینه در نظر گرفته شود، گزینه بهتر از میان دو بلوک، بلوک ماسه سیمان خواهد بود. اما تاثیر همزمان ۴ معیار در حالت اصلی، به برتری بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) می‌انجامد.



شکل ۷- نمودار تحلیل حساسیت کارایی

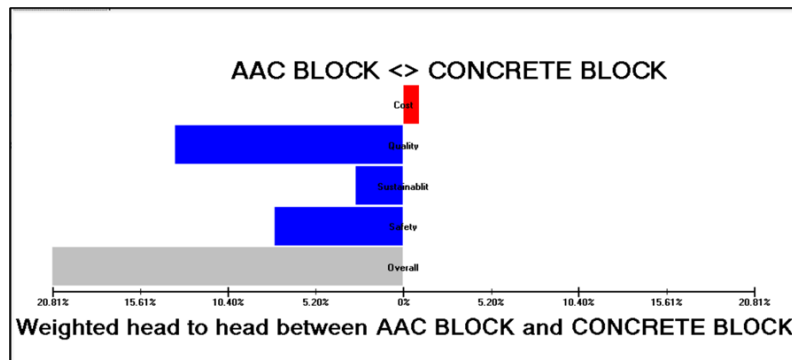
تحلیل حساسیت گرایان اولویت گزینه‌ها را هر بار در رابطه با یک معیار نشان می‌دهد [۴]. در شکل ۸، که نمودارهای هزینه و توسعه پایدار هستند، خط قرمز عمودی نشان دهنده وضعیتی که پاسخ‌دهندگان انتخاب کرده‌اند می‌باشد. تنها معیاری که با تغییر وزن آن، اولویت گزینه‌ها عوض خواهد شد معیار هزینه می‌باشد (نقطه تقاطع اولین نمودار) نمودار دوم نشان می‌دهد که معیار توسعه پایدار هیچ تاثیری رو انتخاب پاسخ‌دهندگان ندارد. نمودارهای کیفیت و ایمنی حالتی و اگر داشتند یعنی با افزایش وزن کیفیت یا ایمنی مطلوبیت بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) افزایش می‌یابد (و بالعکس).



شکل ۸- نمودارهای تحلیل حساسیت گرایان

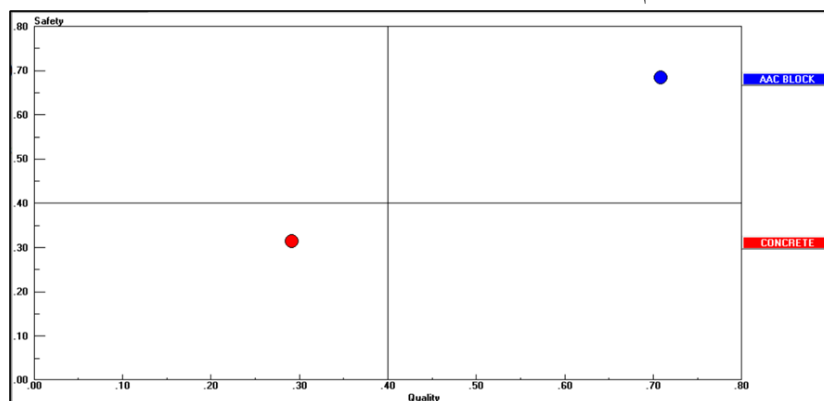
نمودار تحلیل حساسیت سر به سر برای نمایش چگونگی مقایسه دو گزینه در خصوص معیارهای مورد نظر با همدیگر می‌باشند. از آن جایی که در پژوهش ما فقط ۲ گزینه موجود است، تنها یک نمودار برای این نوع تحلیل وجود دارد. شکل ۹ نشان می‌دهد که تنها مزیت بلوک ماسه سیمان نسبت

به بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) قیمت آن می‌باشد و از نظر کیفیت، توسعه پایدار و ایمنی بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) با اختلاف زیادی بهتر می‌باشد.



شکل ۹- نمودار تحلیل حساسیت سر به سر

در تحلیل حساسیت دو بعدی، ارجحیت گزینه‌ها با در نظر گیری همزمان دو معیار نشان داده می‌شوند. در محور افقی یک معیار و در محور عمودی معیار دیگر به صورت درصدی وجود دارند و اهمیت گزینه‌ها به صورت نقطه در آن نشان داده می‌شود. در این نمودارها هر چه نقطه به بالا و گوشه راست نزدیکتر باشد، یعنی آن گزینه مناسب‌تر است. به عنوان نمونه، نمودار دو معیار اصلی کیفیت و ایمنی در شکل ۱۰ آورده شده است. در این نمودار، بلوک ماسه سیمان هم از لحاظ کیفیت و هم از لحاظ ایمنی عملکرد پایبندی از بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) دارد. این نمودارها دید بهتری نسبت به وضعیت دو به دوی معیارها به تصمیم‌گیرندگان می‌دهند.



شکل ۱۰- نمودار تحلیل حساسیت دو بعدی - معیار کیفیت و ایمنی

برای اینکه صحت پاسخ پاسخ‌دهندگان و همچنین صحت کار علمی تایید شود و اینکه مقایسات زوجی انجام شده قابل قبول باشند، در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی نرخ به نام نرخ ناسازگاری وجود دارد که با توجه به مقدار آن می‌توان قابل قبول و یا مردود بودن تصمیم گرفته شده را تعیین کرد. میزان نرخ ناسازگاری تا ۰.۱ قابل قبول می‌باشد [۴]. در جدول ۳، معیارها به همراه اولویت، وزنشان و نرخ ناسازگاری هر یک آورده شده است.

جدول ۳- تقسیم بندی معیارها به همراه وزن و نرخ ناسازگاری هر یک

معیارها	درصد	اولویت معیارها	نرخ ناسازگاری
هزینه	۳۳.۱	۱	۰.۰۰۷
کیفیت	۳۲.۵	۲	۰.۰۰۸
ایمنی	۲۰.۷	۳	۰
توسعه پایدار	۱۳.۶	۴	۰.۰۳۴

۵. نتیجه‌گیری

این مطالعه به طور مبتکرانه از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای ارزیابی عملکرد مقایسه‌ای بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) و بلوک‌های سیمانی ماسه‌ای در چندین معیار از جمله هزینه، زمان، ایمنی، کیفیت و پایداری استفاده می‌کند. با ادغام تجزیه و تحلیل کمی با نظرات کارشناسان از طریق یک بررسی ساختاریافته، این روش امکان ارزیابی جامع و چند معیاره مصالح ساختمانی را فراهم می‌کند. این رویکرد نه تنها درک دقیقی از مزایا و محدودیت‌های هر ماده را تسهیل می‌کند، بلکه یک چارچوب تصمیم‌گیری را پیشرو می‌کند که می‌تواند در مطالعات آینده برای ارزیابی سایر مصالح ساختمانی یا فناوری‌ها تکرار شود. این مطالعه و نظر کارشناسان، برتری بلوک‌های AAC را در اکثر معیارها به جز هزینه روشن می‌کند و بر پتانسیل آنها برای تقویت شیوه‌های ساخت و ساز پایدار تأکید می‌کند.

طبق موضوعات مطرح شده در دانش مدیریت پروژه، در صورتی که کمی هزینه‌های پیشگیری افزایش یابد، در آینده یک صرفه جویی بسیار بزرگ در هزینه کل پروژه اتفاق خواهد افتاد [۱۱]. در این پژوهش این مسئله در انتخاب بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) نمود پیدا می‌کند. یعنی اگر با صرف هزینه بیشتر بلوک با کیفیت بهتر که همان بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) می‌باشد، انتخاب شود، در طول عمر چرخه حیات محصول از هزینه‌های جانبی مانند هزینه مصرف انرژی بیشتر، هزینه بازسازی، هزینه ارزیابی و ... جلوگیری می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده اولویت معیارها در انتخاب بلوک مناسب به ترتیب هزینه، کیفیت، ایمنی و توسعه پایدار می‌باشند.

در انتها با توجه به وضعیت کشور ایران از لحاظ زلزله خیزی و همچنین لزوم بهینه کردن شرایط ساخت و ساز و صرفه جویی در زمان و هزینه و همچنین حصول بهترین نتیجه، به مهندسين و طراحان صنعت ساخت و ساز، طبق نظر خبرگان، استفاده از بلوک بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) پیشنهاد می‌شود. باید در نظر داشت همانطور که اشاره شد صرف هزینه بیشتر در ابتدا، مزایا و سودهای بیشتری در انتها به ارمغان می‌آورد. برای مطالعات آتی، توصیه می‌شود که مزایای اقتصادی بلندمدت استفاده از AAC از نظر صرفه‌جویی در انرژی عملیاتی و هزینه‌های نگهداری بررسی شود. علاوه بر این، بررسی اثرات زیست‌محیطی چرخه عمر هر دو ماده می‌تواند بینش عمیق‌تری در مورد مشخصه‌های پایداری آنها ارائه دهد و به انتقال صنعت به سمت شیوه‌های ساختمان سبز کمک بیشتری کند.



۶. مراجع

۱. پورمحمدی، م. و عندلیب، س. ۱۳۹۳. بررسی میزان کاهش وزن و اتلاف انرژی در دیوارهای غیر باربر با جایگزینی بلوک سبک هبلکس بجای مصالح سنتی، همایش ملی مهندسی عمران، معماری و مدیریت پایدار شهری، گرگان
۲. جعفرپور، ف. و فیروزیار، ف. و ماجدی اردکانی، م. ۱۳۸۲. بلوک‌های سیمانی سبک، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران.
۳. علیزاده خرازی، ب. ۱۳۹۶. ارزیابی و مقایسه تأثیر انواع مصالح مورد استفاده در پوشش ساختمان بر مصرف انرژی با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران، تهران
۴. چوپچیان، ش. و مؤمنی هلالی، ه. ۱۳۹۵. تصمیم‌گیری چندمعیاره: رویکرد فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و به کارگیری تحلیل سوات (SWOT). انتشارات سازمان جهاد دانشگاهی، تهران.
5. Life cycle energy and environmental analysis of partition wall systems in the UK Broun, R. Gillian F. Menzies, a School of Build Environment, Heriot Watt University, EH14 4AS, Edinburgh, UK
6. Yogananth, Y., Thanushan, K., Sangeeth, P., Coonghe, J. G., & Sathiparan, N. (2019). *Comparison of strength and durability properties between earth-cement blocks and cement-sand blocks*. Innovative Infrastructure Solutions, 4(1), 1-9.
۷. اولسن، د. ۱۳۸۷. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، چاپ اول، انتشارات مدیران امروز، تهران.
8. Zahedi, F. 1986. *The analytic hierarchy process: A survey of the method and its applications*. Interfaces 16:4, 96-108.
۹. حبیبی، الف. و آفریدی، ص. ۱۴۰۱. تصمیم‌گیری چندشاخصه، تهران: انتشارات نارون. ۱۳۹۱، <https://parsmodir.com/mcdm/ahp-q.php>
10. Triantaphyllou, E. (1999). *Reduction of pairwise comparisons in decision making via a duality approach*. Journal of Multi-criteria Decision Analysis, 8(6), 299-310.
11. Kerzner, H. (2017). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 12th Ed., Wiley, New York.