

شناسایی معیارهای انتخاب بین سیستم ساخت سنتی و بتنی قالب تونلی در پروژه‌های انبوه‌سازی

مجتبی حسینی‌پور (استادیار)

دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

محسن کاهلی* (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی عمران و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (نماری ۲-۳، شماره ۱/۱، ص. ۱۲۹-۱۲۸، یادداشت فنی)

در انبوه‌سازی استفاده از سیستم بتنی قالب تونلی مزایای قابل توجهی عرضه می‌کند، با وجود بهره‌گیری از مصالح و تجهیزات مدرن در انبوه‌سازی و مشکلات اساسی در سیستم سنتی، هنوز سیستم‌های ساخت‌وساز عمدتاً سنتی است. تا به حال معیارهای انتخاب سیستم ساخت به صورت کلی بوده است. در این تحقیق، در پی مطالعات کتابخانه‌یی و میدانی و مقایسه‌ی جامع بین دو سیستم ساخت، ۲۳ معیار بر پایه‌ی زمان، هزینه، و کیفیت شناسایی شدند. جهت ارزیابی معیارهای شناسایی شده، از شاغلان باتجربه در حوزه انبوه‌سازی از جمله کارفرمایان، مهندسان، و پیمانکاران نظرسنجی شد. تجزیه و تحلیل نتایج مشخص کرد که معیارها در ۵ بعد دسته‌بندی می‌شوند: هزینه‌ی اولیه، قابلیت ساخت‌پذیری، هزینه‌های بلندمدت، اثر معماری و سازه. در ارزیابی معیارها با استفاده از آمار توصیفی و استنباطی، سیستم بتنی قالب تونلی از نظر زمان، هزینه و کیفیت در کشور در شرایط بحرانی کمبود مسکن و متقاضی زیاد، قابل قبول‌تر ارزیابی شد. نتایج این تحقیق می‌تواند به ذینفعان اصلی حوزه انبوه‌سازی همچون دولت مردان، کارفرمایان و مشاوران در انتخاب سیستم مناسب ساخت در هنگام تصمیم‌گیری کمک کند.

m-hosseinalipour@sbu.ac.ir
kamelicivil@yahoo.com

واژگان کلیدی: سیستم بتنی قالب تونلی، سیستم سنتی، زمان، هزینه، کیفیت.

۱. مقدمه

روند رشد جمعیت، نسبت شهرنشینی و ابعاد خانوار در کشورهای با جمعیت جوان نشان می‌دهد که در یک مقطع زمانی، نسبت عرضه‌ی مسکن به تقاضا کم می‌شود. مثلاً در ایران نیاز به مسکن شهری از سال ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۵، ۱۴/۱ میلیون واحد مسکونی برآورد شده است، لذا آنچه می‌تواند بیانگر عملکرد واقعی تحولات بازار باشد، تقاضای مؤثر برای ساخت‌وساز و همچنین سیستم ساخت مناسب و ویژگی‌های کمی و کیفی آن است.^[۱] سیستم‌های سنتی ساخت‌وساز علاوه بر اینکه در مراحل تولید مصالح، قطعات و سازه، ایمنی در برابر زلزله، و طول عمر بهره‌برداری بهینه نیستند، به دلیل سرعت پایین تولید نیز پاسخگوی تقاضای موجود نیستند.^[۲] مؤسسه‌ی تحقیقاتی و انجمن بین‌المللی مهندسی زلزله، وب سایتی به نام دایره‌المعارف مسکن دنیا دارند، که تکنولوژی پایگاه اطلاعات مدرن برای تسهیم اطلاعات روی ساخت مسکن است. آنها سابقه‌ی ساختمان‌های بتن مسلح با دیوارهای آجر بنایی در محیط شهری هندوستان، ۲۵ سال و عملکردشان در برابر زلزله را خیلی ضعیف اعلام کرده‌اند. این ساختمان‌ها در اروپا و در زلزله‌های ۱۹۹۹ یونان، ترکیه، تایوان و ۲۰۰۱ در هندوستان بیشترین آسیب‌پذیری را داشته‌اند.^[۳] سیستم بتنی قالب تونلی یک فرآیند صنعتی است، که

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۱/۶/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۱/۷/۱.

اگر چه در ایران تولید صنعتی ساختمان تونلی جا افتاده است، اما با این حال در بازار ساختمان‌سازی، امتیاز سیستم‌های بتنی قالب تونلی تا حدی کمتر از دیگر

مشخص می‌کنند. برای اطمینان از فهم بهتر معیارها، شرح مشخصات هر معیار، ضمیمه‌ی پرسشنامه شد؛ ضمناً پاسخگویان به ارائه‌ی معیارهای تکمیلی بدون آنکه در پرسشنامه فهرست شوند، تشویق شده بودند تا آنها به تأثیر انتخاب سیستم‌های ساخت توجه کنند.

۲.۲. بررسی پرسشنامه

جهت اعتبارسنجی پرسشنامه‌ی نهایی، یک ارزیابی مقدماتی با پیمانکاران و مهندسان با تجربه انجام شد. سپس پرسشنامه حضوری بین ۲۰ شاغل صنعت انتخاب شده در صنعت ساختمان استان تهران توزیع شد، که ذینفعان اصلی از زنجیره‌ی تأمین مسکن شامل: کارفرمایان، مجریان پروژه، کارشناسان شرکت‌های پیمانکار، و دستگاه نظارت هستند. آنها توجهات و عقاید مختلف در انتخاب سیستم ساخت دارند. به‌دست آوردن نظرهای ۴ گروه، یک مجموعه‌ی معیارهای کلی را برای انتخاب سیستم ساخت تأمین می‌کند. پرسشنامه‌ی ارزیابی به ۳ کارفرما، ۱۰ مجری پروژه، ۳ کارشناس شرکت پیمانکاری و ۴ دستگاه نظارت در استان تهران داده شد. تبادل اطلاعات بین دست‌اندرکاران ساخت، با مراجعه‌ی حضوری و مذاکره در پروژه‌ها و شرکت‌ها به‌دست آمد، به‌طوری‌که یک کار مشارکتی بین تمام مصاحبه‌شوندگان حاصل شد. گروه‌های متفاوت، تضمین‌کننده‌ی دستیابی به نتایج قابل قبولی است. برای فهم بیشتر از نتایج ارزیابی، دو تن از پاسخگویانی که تجربه‌ی بالایی در سیستم بتنی قالب تونلی داشتند، انتخاب و در مورد فرآیند انتخاب سیستم ساخت بعد از برگشت پاسخ‌های ارزیابی، مصاحبه شدند. مخصوصاً از آنها سؤال شد که چطور انتخابشان را در نظر گرفتند، همچنین چرا به بعضی معیارها کمتر یا بیشتر از دیگری اهمیت داده‌اند.

۳.۲. روش تحلیل داده‌ها

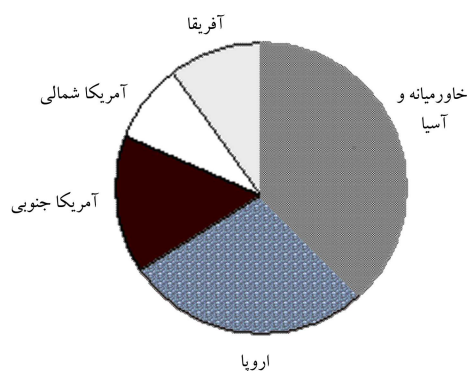
به منظور شناسایی اهمیت نسبی معیارهای اجرایی مورد تأیید مبنی بر ارزیابی اطلاعات کسب شده، تحلیل رتبه‌بندی انجام شد. آنچه را که باید ملاحظه کرد، آن است که رتبه‌بندی فقط ترتیب ردیف اهمیت معیارها را نشان می‌دهد. کاربرد پارامترهای آماری (مانند میانگین‌ها، انحراف استاندارد و...) جهت رتبه‌بندی این قبیل داده‌ها، نتایج پر مفهومی را نخواهد داد، بنابراین باید سیستم‌های ناپارامتری مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه، تحلیل شاخص شدت جهت رتبه‌بندی معیارها براساس اهمیت نسبی انتخاب شده است. جهت تعیین شاخص شدت، رابطه‌ی ۱ استفاده شد.^[۶]

$$SI = \left(\sum_{i=1}^n \frac{w_i f_i}{n} \cdot 100 \right) / 100a \quad (1)$$

(شاخص شدت)

که در آن، i نمره‌ی داده‌شده به هر معیار توسط پاسخگو، که از ۱ تا ۵ تنظیم شده است، w_i وزن هر نمره (درجه‌بندی در مقیاس نمره‌ها: ۱ کمتر مهم و ۵ به شدت مهم)، f_i فراوانی نمره‌ی i توسط تمام پاسخگویان، n تعداد کل پاسخگویان، a بالاترین وزن، در این مطالعه $a = 5$ است. پنج سطوح اهمیت از ارزش SI به این صورت تغییرشکل یافته‌اند: $(0 \leq SI \leq 0.2)$ کمترین، $(0.2 \leq SI \leq 0.4)$ کم تا متوسط، $(0.4 \leq SI \leq 0.6)$ متوسط، $(0.6 \leq SI \leq 0.8)$ متوسط تا بالا، $(0.8 \leq SI \leq 1)$ بالاترین.

برای تهیه‌ی فهرستی مختصر از معیارهای تحت این رویدادها، از تحلیل عاملی استفاده شد. تحلیل عاملی، یک روش آماری مؤثر استفاده‌شده در توصیف تغییرپذیری میان متغیرهای مشاهده‌شده برحسب معدود متغیرهای نهفته، به اسم عامل است. به عبارت دیگر، متغیرهای با مشخصات مشابه با هم در یک مجموعه‌ی کوچک‌تر از



نمودار ۱. گزارش توزیع مسکن در قاره‌ها (مارس، ۲۰۰۴).^[۲]

سیستم‌های نوین همچون قالب سبک فولادی سرد نوردشده، سازه‌ی پیش‌ساخته با اسکلت فولادی پیچ و مهره‌یی و... است (تقریباً ۵۱٪).^[۲] نتایج این تحقیق نشان داد که هنوز تصمیم‌گیری در انتخاب سیستم ساخت اکثراً بر پایه‌ی تجربه‌ی کارهای گذشته است، به‌طوری‌که هیچ معیار ارزیابی مشخص یا استراتژی موجود نیست. ارزیابی کلی سیستم‌ها باید بر پایه‌ی هزینه‌های اولیه، قابلیت ساخت‌پذیری، هزینه بلندمدت، اثر معماری و سازه صورت پذیرد. مشخص است که برای پروژه‌های ساختمان شخصی، سیستم بتنی قالب تونلی، گزینه‌ی مناسبی به‌علت ویژگی‌های متنوع این پروژه‌ها نسبت به سیستم ساخت سنتی نیست. اگر دستور تغییرات، تأخیرات زیاد در تولید، ایجاد برنامه‌ی زمان‌بندی، بالارفتن هزینه‌ی مورد تأیید، و قابلیت ساخت به‌طور مناسب به‌کارگرفته نشود، ممکن است در استفاده از سیستم‌های بتنی قالب تونلی با مشکل مواجه شویم. در حال حاضر معیارهای مشخص و مستندشده‌یی برای تصمیم‌گیری راجع به انتخاب سیستم‌های ساخت موجود نیست، لذا نیاز به ایجاد معیارهای جامع جهت انتخاب سیستم مناسب ساخت شدیداً حس می‌شود. در این تحقیق، دو سیستم مهم در ساختمان‌سازی بحث و بررسی شده‌اند: سیستم ساخت سنتی بتن‌آرمه‌ی درجا با سقف تیرچه بلوک، و سیستم نوین ساختمان‌سازی بتنی قالب تونلی. هدف اصلی این تحقیق، شناسایی معیارهای اجرایی مورد تأیید جهت کمک به ذینفعان اصلی در انتخاب سیستم‌های ساخت مناسب ساختمان‌های بتنی طی مراحل اولیه‌ی پروژه است.

۲. متدولوژی تحقیق

متدولوژی انتخاب‌شده برای این تحقیق متشکل است از: مطالعه‌ی کتابخانه‌یی، مطالعه‌ی میدانی، طراحی و بررسی پرسشنامه، مصاحبه از دست‌اندرکاران صنعت ساختمان استان تهران، و تحلیل آماری اطلاعات.

۱.۲. پرسشنامه

مطالعات کتابخانه‌یی و میدانی نشان داد که هیچ فهرست جامعی از معیارهای اجرایی توسعه‌یافته به ویژه برای انتخاب سیستم ساخت در ساختمان‌های بتنی وجود ندارد، به همین دلیل پرسشنامه‌یی برای ارزیابی ۲۳ معیار، برای نظرسنجی کارشناسان تهیه شد. پرسشنامه شامل ۲ بخش مهم بود: در بخش اول، اطلاعات مربوط به پاسخگویان و سازمان‌هایشان و در بخش دوم، پاسخگویان میزان سطح اهمیت معیارها را بر پایه‌ی مقیاس ۵ گزینه‌یی لیکرت شامل: خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، و خیلی زیاد

جدول ۱. نمونه‌هایی از مقایسه‌ی بین سیستم‌های سنتی و نوین.^[۱]

سیستم ساخت		عوامل مؤثر
سنتی	نوین	
آسان	تخصصی	شرایط شروع
۳۰-۲۵	۱۰۰-۵۰	میانگین عمر و دوام ساختمان
کمتر از سیستم صنعتی	متوسط	ماشین‌آلات سبک مورد نیاز
-	متوسط تا زیاد	ماشین‌آلات سنگین مورد نیاز
متوسط	زیاد	هزینه‌های سرمایه‌ی اولیه
زیاد	متوسط	هزینه‌ی جاری
بیش از ۳ میلیون ریال	کمتر از ۳ میلیون ریال	قیمت تمام شده (به ازای یک متر مربع به قیمت ۱۳۹۰)
حدود ۱٫۵ الی ۲ سال	حدود ۵ الی ۶ ماه	دوره‌ی بازگشت سرمایه
ندارد	دارد	محدودیت‌های طراحی
خوب	متوسط	هاسانگنکی طراحی معماری و ساخت
کم	متوسط	مشکلات نگهداری
کم	زیاد	سهولت اجرا
اتلاف زیاد	اتلاف بسیار کمتر	ویژگی مصرف مصالح
زیاد	کم	اتلاف انرژی
کم	زیاد	امکان نظارت بر اجرا
فناوری‌های پیشرفته	استفاده‌ی محدود از فناوری‌های گسترده از فناوری‌های پیشرفته	فناوری
زیاد	کم	اثرات منفی بر محیط زیست

که سیستم ساخت نوین و سنتی به وضوح با انتخاب معیارها قابل مقایسه هستند. بدین‌گونه، یک ضرورت جهت مقایسه‌ی جامع دو سیستم ساخت وجود دارد (جدول ۱). در این نوشتار، مقایسه‌ی جامع در دو سیستم سنتی و نوین به علت محدودیت فضا عملی نبود؛ بنابراین، یک مقایسه‌ی کلی ارائه شد.

۳.۳. معیارهای اجرایی

مقایسه‌ی دو سیستم با جنبه‌های هزینه، زمان، و کیفیت انجام شد. این یک بستر با ارزش را برای توسعه‌ی معیارهای اجرایی به وجود آورد. بیشتر اعضای تیم پروژه، اختلاف‌نظرها و نیازهایی در طی فرایند انتخاب سیستم ساخت داشتند. همچنین جهت ایجاد یک فهرست، معیارهای کلی برای تصمیم سیستم ساخت مناسب، احتیاجات گوناگون از پروژه‌ها به طور مناسب مطرح شد. محدوده‌ی این معیارها از جنبه‌های هزینه، زمان و کیفیت در محور X؛ و احتیاجات و نقطه نظرات گوناگون از ذینفعان اصلی همچون کارفرمایان، مجریان پروژه، کارشناسان شرکت‌های پیمانکاری، مهندسان دفاتر فنی رتبه‌ی یک در محور Y، نشان داده شده است (جدول ۲). روی هم رفته، کل ۲۳ معیار که برای ارزیابی سیستم ساخت انتخاب شده بودند در جدول ۲ نشان داده شده است (۱۰ معیار هزینه، ۳ معیار زمان، و ۱۰ معیار کیفیت).

عوامل یا ابعاد غیروابسته کاهش داده شده است، به طوری که در مغایرت مشاهده شده در تعداد زیادی از متغیرها، قابل توصیف هستند. این تحلیل با کمک نرم‌افزار آماری SPSS ۱۸ انجام شد. اندازه‌گیری شاخص KMO^۱ و آزمون بارنتل^۲ جهت بازرسی کفایت نمونه‌برداری انجام شد. جزء اصلی تحلیل بر حسب خلاصه‌ی عوامل پنهان مبنی بر معیاری که مقدار ویژه‌ی مرتبط باید بزرگ‌تر از ۱ باشد، انتخاب شده است. جهت تفسیر ارتباط بین متغیرهای مشاهده‌شده و عوامل پنهان با سهولت بیشتر، طبق معمول روش چرخشی (چرخشی واریانس) انتخاب شد.

۳. توسعه‌ی معیارها

۳.۱. مطالعات گذشته روی معیارهای مرتبط

بررسی وسیع مستندات در سطوح مربوط شامل: پیش‌سازی، نصب اولیه، ساخت مدولار و خارج کارگاه (PPMOF)^۳، ساختمان پیش‌ساخته، ساختمان بتنی مرکب (HCC)^۴، ساختمان بتنی پیش‌تئیده/پیش‌ساخته، اجزای ساختمان‌سازی پیش‌ساخته بودند. در فرایند اصلی ارزیابی، استفاده از PPMOF که پروژه‌های خیلی خاص هستند، محدوده‌ی این مطالعات خیلی منظم از امکان‌پذیری، هزینه و برنامه‌ی زمان‌بندی گزینه‌های متعدد برای تصمیمات سریع مبنی بر بینش و قضاوت توصیف شده است.^[۱] همچنین امکان‌پذیری PPMOF با کاربرد ۱۰ نوع عامل تصمیم که شامل ۴ تا ۱۰ سؤال تفضیلی برای هر نوع متغیر ارزیابی شده است.^[۸] در ضوابط ساختمان بتن مرکب، معیارهای مهم پیمانکاران در انتخاب و استفاده از ساختمان بتنی مرکب شناسایی شده است.^[۹] شاخص‌های اجرای ساختمان بتن مرکب در همه حال جهت آگاهی از فرایند تصمیم‌گیری در پذیرفتن تکنولوژی ساختمان بتن مرکب بیشتر از پیشنهادهاى متداول کمک خواهند کرد.^[۱۰]

در پژوهشی ارزیابی در صنعت ساختمان UK جهت بررسی تأثیر عوامل مربوط ساختمان در انتخاب سیستم‌های سقف بتنی (ساخت درجا، پیش‌ساخته و مرکب) انجام شد و سرانجام ۱۲ عامل هنگام ارتباط با مرحله‌ی ساخت شناسایی شدند.^[۶] این تحقیق به تهیه‌ی فهرستی از معیارهای کلی بر پایه‌ی شرایط و نتیجه‌ی نهایی سه‌گانه (زمان، هزینه و کیفیت) از شروط مختلف پروژه توجه کرده است، تا اینکه امکان اجرای بالقوه‌ی بهتر سیستم‌های ساخت را به دست آورد.

۳.۲. مقایسه‌ی بین سیستم ساخت سنتی و تونلی نوین

اسکلت ساخت سنتی شامل عناصر افقی (تیرها) و قائم (ستون‌ها) و سقف تیرچه بلوک است که با فعالیت‌های گسترده‌ی ساخت درجا، نیروی انسانی زیاد، نتایج ایمنی ضعیف، زمان طولانی ساخت و ضایعات زیاد همراه است. درجه‌ی صنعتی‌بودن این سیستم پایین است. اسکلت بتنی ساختمان تونلی فقط شامل دیوارهای بتنی برشی و سقف‌های دال بتنی و فاقد هرگونه اعضای سازه‌ی معمول نظیر تیر و ستون است. از آنجا که اجرای قالب‌بندی سقف و دیوار به صورت سلولی و هم‌زمان انجام می‌شود، به نام تونلی معروف است. در این شیوه‌ی اجرا، دیوارها و سقف‌های بتن مسلح به صورت هم‌زمان آرماتوربندی، قالب‌بندی، و بتن‌ریزی می‌شوند. در این سیستم دال‌ها از سه طرف با دیوار برشی مهار می‌شوند، به طوری که یک طرف به‌منظور تأمین قالب‌بندی در نظر گرفته می‌شود.^[۱۲] سیستم نوین با محیط کارگاه منظم و پاکیزه‌تر، کاهش ضایعات، زمان ساخت و هزینه‌ی تمام‌شده‌ی کمتر نسبت به سیستم قبلی است.

در این نوشتار، معیارهای ارزیابی قابلیت‌ی برای انتخاب سیستم ساخت ارائه داده‌اند

جدول ۲. معیارهای انتخاب سیستم ساخت در ساختمان‌های بتنی.

معیار		هزینه	ذینفعان
کیفیت	زمان		
Q _۱ : کنترل پروژه	T _۱ : سرعت اجرا	C _۱ : هزینه‌ی هر متر مربع زیربنا	کارفرمایان، مجریان پروژه، کارشناسان شرکت‌های پیمانکاری، مهندسان دفاتر فنی رتبه یک
Q _۲ : ارتقاء دانش فنی	T _۲ : زمان بهینه‌ی اجرا	C _۲ : هزینه‌ی حمل برای هر متر مربع	
Q _۳ : تنوع در طرح معماری	T _۳ : محدودیت‌های فصلی	C _۳ : مصرف مصالح	
Q _۴ : رفتار و مقاومت سیستم در برابر زلزله		C _۴ : نیروی انسانی	
Q _۵ : رفتار و مقاومت سیستم در برابر حریق		C _۵ : تعمیر و نگهداری	
Q _۶ : سبک‌سازی		C _۶ : عمر مفید و دوام	
Q _۷ : مصرف انرژی		C _۷ : هزینه‌ی اولیه ساخت	
Q _۸ : بهداشت و ایمنی کارگران		C _۸ : سرعت برگشت سرمایه	
Q _۹ : ضایعات		C _۹ : یکپارچگی زنجیره‌ی تأمین (تدارکات)	
Q _{۱۰} : تأمین پارکینگ		C _{۱۰} : ضایعات	

هزینه، زمان، و کیفیت به ترتیب ۰/۷۰۵، ۰/۷۱۶ و ۰/۷۳۱ به دست آمد. همه‌ی مقادیر آلفا، بزرگ‌تر از ۰/۷ هستند؛ پس همه‌ی ضرایب پایایی قابل قبول‌اند و سازگاری داخلی معیارها مناسب است.

۴. بحث و تجزیه و تحلیل

۱.۴. مشخصات نمونه

برای تجزیه و تحلیل از ۲۰ پرسشنامه‌ی ارسالی، ۱۶ عدد قابل استفاده بود؛ زیرا پاسخ ۳ پرسشنامه‌ی متخصصان ساخت سستی، غیرمنطقی بود و یک پرسشنامه کلاً جواب داده نشده بود. بقیه‌ی پرسشنامه‌ها را افراد باتجربه در هر دو پروژه‌ی ساختمان سستی و تونلی پاسخ داده بودند. حدود ۳۸٪ پاسخ‌دهندگان بین ۵ تا ۱۰ سال تجربه، ۱۸٪ بین ۱۰ تا ۱۵ سال، ۱۸٪ بین ۱۵ تا ۲۰ سال، ۱۲٪ بین ۲۰ تا ۲۵ سال و ۱۲٪ بیشتر از ۳۰ سال در صنعت ساختمان تجربه داشتند (نمودار ۲). همان‌طوری که تجربه‌ی پاسخگویان در صنعت ساختمان، کاملاً قابل احترام است؛ عقاید و نظرات راجع به سطح اهمیت معیارهای ارزیابی شده، می‌تواند مهم و قابل اطمینان باشد.

۲.۴. پایایی پرسشنامه

آلفای کرونباخ با نرم‌افزار SPSS ۱۸، برای آزمایش پایایی سازگار داخلی محاسبه شد. محدوده‌ی ضریب پایایی آلفا معمولاً بین ۰ و ۱ است. آلفا محدود به یک، بزرگ‌ترین پایایی سازگار داخلی معیارهاست. مقادیر آلفای کرونباخ برای معیارهای

۳.۴. تحلیل رتبه‌بندی

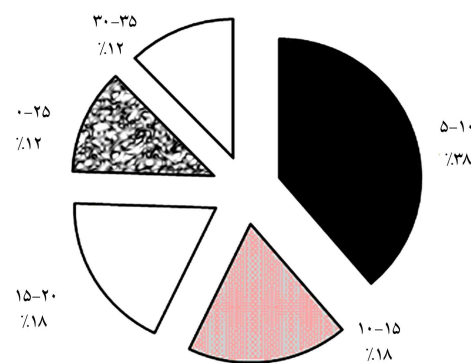
با گرفتن اطلاعات از نرم‌افزار SPSS ۱۸، مقادیر شاخص شدت با کاربرد فرمول ۱ محاسبه شدند. بر پایه‌ی مقدار شاخص‌های شدت، نتایج رتبه‌بندی برای هر دسته معیار (رتبه‌بندی با رده) و برای همه معیارها (رتبه‌بندی کلی) به ترتیب نزولی ارائه شده‌اند (جدول ۳). بر پایه‌ی این نتایج رتبه‌بندی، ۳ معیار با سطوح اهمیت بالا در ارزیابی سیستم‌های ساخت با مقدار شاخص شدت بین ۰/۸۸۵ و ۰/۹۱۲ مشخص شدند. این ۳ معیار عبارت‌اند از: سرعت اجرا (T_۱)، هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت (C_۱)، و زمان بهینه‌ی اجرا (T_۲).

سرعت اجرا علاوه بر اولویت اول در دسته‌ی زمان (SI = ۰/۹۱۲) و سطح اهمیت بالا، میان همه‌ی معیارها بالاترین مقدار را دارد؛ هزینه‌های اولیه‌ی ساخت چه گذشته، چه حال، نگرانی اصلی برای تیم پروژه در دو سیستم بوده است؛ مشاهده شد که این ۳ معیار، در باره‌ی زمان و هزینه هستند، زمان و هزینه به‌منزله‌ی مهم‌ترین عوامل برای انتخاب سیستم ساخت هستند.

بر اساس جدول ۳، ۹ معیار شامل ۴ معیار هزینه و ۵ معیار کیفیت با سطح اهمیت متوسط - بالا ثبت شده‌اند. اگرچه ۹ معیار در سطح اهمیت رده‌ی یکسان هستند، اما معیار کیفیت (SI = ۰/۶۵۷) در مقایسه با معیار هزینه (SI = ۰/۶۶۵) اهمیت کمتری دارند. به هر حال، باید توجه شود که در این سطح اهمیت، معیار کیفیت ۵۶٪ است. بعضی معیارها در دسته‌ی کیفیت، اهمیت بالایی در سطح متوسط - بالا دارند. برای مثال، کنترل پروژه به‌عنوان اولین زیرگروه کیفیت ارزیابی شد، و در ۹ معیار، با SI = ۰/۶۸۷ به‌عنوان دومین آیتیم است.

میان معیارهای با سطوح اهمیت متوسط - بالا، مقاومت ساختمان در برابر زلزله (Q_۴) نمونه‌ی خوب دیگری است که به‌عنوان بااهمیت‌ترین معیار در زیررده‌ی کیفیت با SI = ۰/۶۷۵ مرتب شده است.

۸ معیار، سطوح اهمیت متوسط با SI بین ۰/۴۳۸ و ۰/۵۶۲ دارند: یکپارچگی زنجیره‌ی تأمین (C_۶)، مصرف مصالح (C_۷)، نیروی انسانی (C_۸)، محدودیت‌های



نمودار ۲. تجربیات ارزیابان در صنعت ساختمان.

جدول ۳. ردیف معیارها برای انتخاب سیستم ساخت.

شاخص	معیارها	شاخص شدت	رتبه بندی	رتبه بندی کلی	سطح اهمیت
هزینه	C _۱ : هزینه‌ی اولیه ساخت	۰/۸۸۷	۱	۲	بالاترین
	C _۲ : هزینه‌ی هر متر مربع زیربنا	۰/۷۷۵	۲	۴	متوسط - بالا
	C _۳ : سرعت برگشت سرمایه	۰/۶۷۵	۳	۷	متوسط - بالا
	C _۴ : ضایعات	۰/۶۱۲	۴	۱۱	متوسط - بالا
	C _۵ : عمر مفید و دوام	۰/۶	۵	۱۲	متوسط - بالا
	C _۶ : یکپارچگی زنجیره‌ی تأمین	۰/۵۶۲	۶	۱۴	متوسط
	C _۷ : مصرف مصالح	۰/۵۲۵	۷	۱۶	متوسط
	C _۸ : نیروی انسانی	۰/۴۶۲	۸	۱۸	متوسط
	C _۹ : تعمیر و نگهداری	۰/۳۲۵	۹	۲۱	کم - متوسط
	C _{۱۰} : هزینه‌ی حمل برای هر مترمربع	۰/۲۶۵	۱۰	۲۳	کم - متوسط
زمان	T _۱ : سرعت اجرا	۰/۹۱۲	۱	۱	بالاترین
	T _۲ : زمان بهینه‌ی اجرا	۰/۸۸۵	۲	۳	بالاترین
	T _۳ : محدودیت‌های فصلی	۰/۵۸۷	۳	۱۳	متوسط
کیفیت	Q _۱ : کنترل پروژه	۰/۶۸۷	۱	۵	متوسط - بالا
	Q _۲ : رفتار و مقاومت سیستم در برابر زلزله	۰/۶۷۵	۲	۶	متوسط - بالا
	Q _۳ : تنوع در طرح معماری	۰/۶۶۳	۳	۸	متوسط - بالا
	Q _۴ : ضایعات	۰/۶۵	۴	۹	متوسط - بالا
	Q _۵ : تأمین پارکینگ	۰/۶۱۳	۵	۱۰	متوسط - بالا
	Q _۶ : مصرف انرژی	۰/۵۳۸	۶	۱۵	متوسط
	Q _۷ : ارتقاء دانش فنی	۰/۴۸۸	۷	۱۷	متوسط
	Q _۸ : سبک‌سازی	۰/۴۵	۸	۱۹	متوسط
	Q _۹ : بهداشت و ایمنی کارگران	۰/۴۳۸	۹	۲۰	متوسط
	Q _{۱۰} : رفتار و مقاومت سیستم در برابر حریق	۰/۳	۱۰	۲۲	کم - متوسط

به وضوح از نتایج مشخص است که همه‌ی معیارها مهم هستند (جدول ۳). کل معیارها با سطح اهمیت بالا، متوسط - بالا، متوسط و کم - متوسط برای استفاده هنگام انتخاب سیستم ساخت ارزیابی شدند. در طی مصاحبه و ارزیابی، ذینفعان اصلی تأمین مسکن تأکید کردند معیارهایی که آنها کمتر ارزیابی کردند به این معنی نیست که مهم برای انتخاب سیستم ساخت نیستند، بلکه آنها ترجیحاً جهت تعیین اهمیت نسبی از نقطه‌ی مزیت بیان شدند.

۴.۴. تحلیل عامل

اگرچه مهم‌ترین معیارها در کاربرد تحلیل رتبه‌بندی شناسایی شدند، اما بعضی از آنها احتمالاً با یکدیگر از طریق زیرساختار عوامل اولیه وابسته اند. بدین منظور برای به‌دست‌آوردن فهرست کوتاه از معیارها، تحلیل عامل اجرا شد. در معیار اقتصادی، ۱۶ پاسخ معتبر مربوط به ۱۱ معیار برای انجام تحلیل عامل در SPSS ۱۸ ثبت شد. نتایج تحلیل نشان داد که اندازه‌ی KMO از کفایت نمونه‌گیری ۰/۶۳۶ بود که بزرگ‌تر

فصلی (T_۳)، مصرف انرژی (Q_۶)، ارتقاء دانش فنی (Q_۷)، سبک‌سازی (Q_۸) و بهداشت و ایمنی کارگران (Q_۹).

در پروژه‌های سنتی، یکپارچگی زنجیره‌ی تأمین (زمان تدارک) در زمان قبل از ساخت غفلت شده و حالا هنگام انتخاب سیستم ساخت در مقایسه با سیستم بتنی قالب تونلی یک نگرانی اصلی است؛ مصرف انرژی با $SI = 0/538$ معیار دیگری با سطح اهمیت متوسط که پاسخگویان تشخیص دادند، در استفاده‌ی ساختمان در کل استفاده‌ی انرژی غالب است. ذخیره‌ی انرژی در ساختمان‌های بتنی قالب تونلی به آسانی با ترکیب توده‌ی حرارتی بتن با مقدار بهینه‌ی عایق‌کاری در دیوارهای بتنی دست‌یافتنی است.

یک ملاحظه‌ی جالب توجه این است که بهداشت و ایمنی کارگران، آخرین مورد در سطح اهمیت متوسط با کمترین $SI = 0/438$ است؛ اما برای همه‌ی دست‌اندرکاران پروژه، این موضوع اهمیت بالایی دارد. هنگام مقایسه‌ی دو سیستم به‌علت محیط‌های کاری ایمن و تمیزتر سیستم بتنی قالب تونلی، منفعت‌های عمده‌ی استنباط شد، از جمله کاهش قابل توجه در میزان حادثه برای کارگران.

جدول ۴. ضریب وزن برای معیار اقتصادی.

عوامل اقتصادی پنهان		
متغیرهای اقتصادی	هزینه‌ی اولیه	قابلیت ساخت
C _۱ : هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت	۰/۷۵۴	بلندمدت
C _۷ : مصرف مصالح	۰/۷۵۳	بلندمدت
C _۸ : نیروی انسانی	۰/۶۱۰	بلندمدت
T _۱ : سرعت اجرا	۰/۸۱۰	بلندمدت
T _۲ : زمان بهینه‌ی اجرا	۰/۸	بلندمدت
C _۲ : هزینه‌ی هر مترمربع زیربنا	۰/۷۸۷	بلندمدت
C _۶ : یکپارچگی زنجیره‌ی تأمین	۰/۷۷۲	بلندمدت
C _۴ : ضایعات	۰/۷۰۶	بلندمدت
C _۵ : عمر مفید و دوام	۰/۸۱۸	بلندمدت
C _۲ : سرعت برگشت سرمایه	۰/۷۳۴	بلندمدت
C _۹ : تعمیر و نگهداری	۰/۵۸۸	بلندمدت
مقادیر ویژه	۲/۵۶	۲/۱۶
واریانس (%)	۲۳/۲۴	۱۹/۶۸
واریانس تجمعی (%)	۲۳/۲۴	۴۲/۹۲

جدول ۵. ضریب وزن برای معیار کیفیت.

عوامل کیفیت		متغیرهای کیفیت
معماری	سازه	
۰/۷۹۸		Q _۳ : تنوع در طرح معماری
۰/۷۸۳		Q _۹ : بهداشت و ایمنی کارگران
۰/۷۸۳		Q _۷ : ارتقاء دانش فنی
۰/۶۹۰		Q _۶ : مصرف انرژی
۰/۸۲۳		Q _۲ : رفتار و مقاومت سیستم در برابر زلزله
۰/۷۸۲		Q _۸ : سبک‌سازی
۲/۲۱	۱/۷۴	مقادیر ویژه
۳۶/۸۸	۲۹	واریانس (%)
۳۶/۸۸	۶۵/۹۳	واریانس تجمعی (%)

انتخاب سیستم ساخت در ساختمان‌های بتنی نتیجه شدند. ۳ عامل زیر مجموعه‌ی اقتصادی و ۲ عامل زیر مجموعه‌ی کیفیت هستند. توصیف ۵ عامل پنهانی در بخش بعد ارائه شده است.

۱.۴.۴. هزینه‌ی اولیه

عامل ۱ به عنوان هزینه‌ی اولیه معرفی شده است که به هزینه‌های اولیه‌ی ساخت، مصالح و نیروی انسانی مرتبط است. هزینه‌ی اولیه در هنگام انتخاب سیستم ساخت، دانسته یا ندانسته نقش اصلی پروژه‌های سستی هم بوده است.

برای سیستم بتنی قالب تونلی، انتفاع اقتصادی ممکن است به آسانی ارزیابی نشود. براساس تحقیقات میدانی، هزینه‌ی اولیه‌ی انبوه‌سازی سیستم بتنی قالب تونلی حدود ۸۰٪ بالاتر از ساخت سنتی است. هزینه‌ی اولیه‌ی بالاتر بیشتر به علت هزینه‌ی قالب و احتیاجات تجهیز تاورکرین برای جابجایی قالب است. توجه شود قالب‌های تونلی بعد از ۱۵ بار و قالب‌های سنتی بعد از ۶۰ بار مستهلک می‌شوند، پس می‌توان نتیجه گرفت که برای یک پروژه‌ی ۱۰۰۰ واحدی با ۱۵ بلوک ۱۰ طبقه و اجرای هم‌زمان دو بلوک با توجه به توان مالی، فضای محوطه، انبار مصالح، حمل و نقل و...، دو سبت قالب (هر سبت ۳۵۰ میلیون تومان و ۶۰۰ مترمربع مساحت هر طبقه را پوشش می‌دهد) بدون تعمیر تا انتهای کار نیاز است، در حالی که در سیستم سنتی با دو سبت قالب معمولی (هر سبت ۶۰ میلیون تومان و ۶۰۰ مترمربع مساحت را پوشش می‌دهد) تقریباً ۲ مرتبه تعمیر یا تعویض لازم است. قالب اسقاطی به عنوان ضایعات کیلویی ۳۰۰ تومان خریداری می‌شود.

در این مثال، برای برابری زمان ساخت، در سیستم تونلی دو سبت قالب و در سیستم سنتی برای هر بلوک یک سبت قالب نیاز است. در این صورت هزینه‌ی اولیه‌ی سیستم سنتی بیشتر از سیستم تونلی می‌شود. به هر حال اگر در مراحل اولیه، تعداد مشابه بالایی از واحدهای ساختمان طراحی شده باشد؛ تولید انبوه مصالح در کارخانه (قالب، پله‌ی پیش‌ساخته، مش آماده و...) و خط تولید در کارگاه، ارتباط خوبی بین مهندسان، پیمانکاران و تولیدکنندگان برقرار می‌کند که هزینه‌ی اولیه را کاهش می‌دهد. تحقیقات نشان دادند که متوسط هزینه‌ی ساخت پیش‌سازی فقط کمی بالاتر از سیستم ساخت پای کار است (۳٪ تا ۲۵٪). اکثر پیمانکاران کاملاً آگاه هستند که آنها هنگام استفاده از پیش‌سازی سود مالی دارند.^{[۱۴] [۱۳]} مقدار مصرف مصالح برای دو سیستم ساخت در ساختمان‌های میان‌مرتبه‌ی ۱۰ طبقه معلوم است (جدول ۶).

کمبود نیروی انسانی آرمان‌توربند و قالب‌بند از مشکلات سیستم ساختمان تونلی است که به دلیل پیچیده‌بودن سیستم، دستمزد این افراد ۳۳٪ بیشتر از سیستم

از ۵٪ پیشنهادی، نمونه‌ی قابل قبول برای تحلیل عامل است. عدد ۷۵ آزمون بارتل (همبستگی بین متغیرها) و سطح معناداری ۰/۰۴، نشان‌دهنده‌ی این است که ماتریس همبستگی افراد، ماتریس واحدی نیست. هر دو آزمایش نشان دادند که اطلاعات به دست آمده در معیار اقتصادی، کاربرد تحلیل عامل را فراهم کرده و این‌ها می‌توانند در مجموعه‌ی کوچک‌تر از عوامل اساسی گروه‌بندی شوند. کاربرد عمده‌ی تحلیل اجزاء، تحلیل عاملی که سه عامل پنهان را با مقدار ویژه‌ی بزرگ‌تر از ۱ برای ۱۱ معیار اقتصادی با ۶۰٪ واریانس نتیجه داده است. ماتریس ضریب وزن چرخیده‌شده بر پایه‌ی چرخش واریانس برای ۳ عامل پنهان نشان داده شده است (جدول ۴). ضرایب معیارها، وابستگی بین متغیرهای مشاهده‌شده و عوامل پنهانی است. وابستگی‌ها با عنوان ضرایب وزن اشاره شده‌اند. قدرمطلق بالاتر وزن، پشتیبانی بیشتر عامل پنهان از متغیرهای مشاهده‌شده است. ضریب وزن با قدرمطلق کمتر از ۰/۵ برای کمک به ساده‌سازی، در جدول گذاشته نشده است. برای تفسیر بیشتر، ۳ عامل پنهان همچون عامل ۱ (هزینه‌ی اولیه)، عامل ۲ (قابلیت ساخت) و عامل ۳ (هزینه‌ی بلندمدت تحت معیار اقتصادی) نامیده شدند.

برای معیار کیفیت، نتایج تحلیل عامل نشان داد که اندازه‌ی KMO، ۰/۶۳۹ و همچنین آزمایش بارتل قابل توجه است که اشاره کرده است تحلیل عامل در شناسایی زیرساختار معیار کیفیت مناسب است. در این معیار، با تحلیل تمام عوامل، اندازه‌ی KMO کمتر از ۰/۶ (عدم تأثیر واریانس معیارها بر واریانس مشترک عامل پنهانی) و Sig آزمون بارتل بزرگ‌تر از ۰/۰۵ (تأیید فرض صفر مبنی بر ماتریس واحد و همبستگی) می‌شود که در این صورت نتایج تحلیل عاملی برای داده‌های مورد نظر مناسب نیست، به همین دلیل فقط بعضی از معیارها مورد تحلیل قرار گرفته است (جدول ۵). دو عامل تحت معیار کیفیت به نام‌های اثر معماری و سازه، از تحلیل عامل نتیجه شده است. همراه با ماتریس ضریب وزن چرخیده، درصد واریانس قابل نسبت به هر عامل و مقادیر واریانس تجمعی آمده است. از جدول ۵، واریانس کل ۲ عامل از ۶ معیار کیفیت، ۶۵/۹۳٪ مشاهده می‌شود.

روی هم رفته، مجموعاً ۵ عامل پنهانی با ارائه‌ی زیرساختار معیار استفاده‌شده برای

۲.۴.۴. قابلیت ساخت

دومین بعد، مرتبط با یکپارچگی زنجیره‌ی تأمین، سرعت اجرا، زمان بهینه‌ی اجرا، ضایعات و هزینه‌ی هر مترمربع زیربنا که مجموعاً به‌عنوان قابلیت ساخت تفسیر شده است. قابلیت ساخت علاوه‌بر اینکه احتیاجات ذی‌نفعان معرفی کرده است، تأثیر استفاده از منابع ساخت را آسان و سهولت ساخت پای‌کار را بالا برده است. به‌طور کلی، یک سیستم ساخت کارآمد با قابلیت ساخت خوب معنی می‌دهد که جریان مدیریت بهبودیافته‌ی از مصالح و دیگر منابع ساختمانی به‌واسطه‌ی تأمین‌کنندگان، و یکپارچگی عالی از تأسیسات مکانیکی /الکتریکی و فرآیند ساخت روان وجود دارد که می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها و زمان ساخت شود.

مصالح ساختمانی پروژه‌های سنتی از طریق خرید عمده و جزئی، در فقدان همکاری بلندمدت پیمانکاران و تأمین‌کنندگان به‌دست می‌آید. به‌عبارت دیگر، مصالح ساختمانی سیستم بتنی قالب تونلی، اکثراً از تولیدکنندگان ثابت به‌دست آمده است و تولید انبوه، خرید عمده را باعث می‌شود. به‌طور مهم‌تر، پیوستگی، ساخت مداوم و نصب اجزای پیش‌ساخته، سیستم بتنی قالب تونلی را کاملاً به خط سیر برنامه‌ی زمان‌بندی متوجه کرده است. گواهی این مطلب، مطالعات قبلی است که با فرض ایده‌آل بودن تمام فعالیت‌ها در ساخت سنتی، متوسط کاهش در زمان ساخت اسکلت را دست‌کم ۲۵٪ نشان داده است.^[۱] توسعه‌دهندگان و پیمانکاران، تأثیرات ساختمان‌ها با این سیستم را احساس کرده‌اند.

مسئولان اجرای شرکت‌های پیمانکاری تأکید داشتند که هنگام انتخاب سیستم بتنی قالب تونلی، دوره‌های طولانی‌تر و با هم، با هماهنگی‌های عالی بین معماران، پیمانکاران مادر و پیمانکاران جزء برای تصویب طرح ساختار، برنامه‌ریزی ساخت و تهیه نیاز است. این شروع پروژه‌های پای کار را به تأخیر می‌اندازد و لازم است که احتیاجات از شروع تا کل مرحله‌ی طرح و ساخت یکپارچه باشند و تأمین‌کنندگان خارج کارگاه و پیمانکاران جهت کمیته‌سازی زمان تدارکات بیشتر با یکدیگر هماهنگ باشند. حذف فعالیت‌های درجا از مسیر بحرانی سراسر مراحل ساخت، باعث وابستگی کمتر مراحل ساخت روی آب و هوا می‌شود. فرآیند ساخت با تولید انبوه اجزای پیش‌ساخته در کارخانه تسریع می‌شود. مدت پروژه فشرده‌تر می‌شود اگر:^[۱۴]

۱. تبادل اطلاعات شناسایی شده باشد،

۲. ارتباط رشته‌های مختلف مهندسی در گزارش باشد،

۳. فعالیت‌ها هم‌پوشانی شده باشند.

کارشناسان پروژه‌ها، میانگین زمان ساخت یک طبقه با مساحت ۶۰۰ مترمربع در سیستم تونلی و سنتی به ترتیب ۲/۵ و ۱۶ روز می‌دانند، پس هر دو بلوک به ترتیب ۲۵ و ۱۶۰ روز و برای کل پروژه به ترتیب ۲۰۰ و ۱۲۸۰ روز زمان نیاز است. در برآورد زمان با دو ست قالب در هر سیستم، زمان ساخت اسکلت سنتی ۶/۵ برابر ساختمان تونلی است.

صنعت ساختمان همیشه تولیدکننده‌ی عمده‌ی ضایعات مصالح بوده است. در ساختمان‌های سنتی، ۱۰٪~۵٪ از مصالح به‌صورت دورریز به هدر می‌رود.^[۱] ضایعات ساخت از یک محدوده‌ی فعالیت‌های ساخت تولید می‌شوند؛ اما همه‌ی فعالیت‌ها، مقدار یکسان ضایعات تولید نمی‌کنند. اساساً ضایعات ساخت در سیستم‌های سنتی هم از کار درجا، برش آرماتورهای تقویتی، بتن ریخته‌شده یا اضافی و... و هم از کارهای موقت لازم برای ساخت، تخته‌های چوبی قالب و حائل موقت و... تولید می‌شوند. دوباره‌کاری به منظور تکمیل، علاوه‌بر نتایج ضایعات ساخت، نیاز به جایگزینی، حذف یا گسترش کار قبلی دارد. یک سری از کارها در کارگاه صنعتی انجام شده است جایی که کنترل خوبی از مقادیر مصالح تشکیل‌دهنده

جدول ۶. مقایسه‌ی میزان مصرف مصالح در ۲ سیستم ساخت.^[۱۵]

نوع مصالح	واحد	اسکلت		بتنی		قالب تونلی
		سقف	دیوار	تیرچه بلوک	سفال	
قالب	m ² /m ²	دیوار و سقف	محل	۰/۷	مقدار	۲/۴
میلگرد	kg	پی	ستون	۹	۹	۹
		تیر و سقف تیرچه بلوک	جمع	۱۴	۵۳	۳۳
		پی	جمع	۰/۰۸	۰/۰۸	۴۲
بتن ۳۵۰	m ²	ستون	تیر و سقف تیرچه	۰/۰۵	۰/۲	۰/۳۸
		جمع	جمع سفال	۰/۳۳	۰/۴۶	۰
سفال سقف	عدد	۸				

جدول ۷. تعداد نیروی انسانی موردنیاز در دو سیستم ساخت.

نیروی انسانی	ساختمان تونلی		ساختمان سنتی	
	در روز	در دوره‌ی ۲ روزه‌ی اسکلت	در روز	در دوره‌ی ۱۶ روزه‌ی اسکلت
مهندس اجرا	۲	۴	۲	۳۲
تأسیسات	۱	۱	۱	۲
نقشه‌بردار	۱	۱	۰	۰
کمک نقشه‌بردار	۱	۱	۱	۱
هماهنگ‌کننده	۳	۶	۲	۳۲
کارگر ساده	۵	۱۰	۱۰	۸۰
آرماتوربند	۷	۱۴	۹	۷۲
قالب‌بند	۷	۱۴	۹	۷۲
بتن‌ریز	۵	۵	۵	۱۰
نچار	۰	۰	۳	۶
گیچ‌کار	-	۱۸	-	۳۶

ساختمان سنتی است. چیدمان صحیح قالب‌ها در کمترین زمان و ترازکردن آنها از مهم‌ترین کار قالب‌بند‌های سیستم تونلی است. تعداد نیروی انسانی پروژه‌های تونلی و سنتی در حال احداث سطح استان، با گردآوری اطلاعات از کارشناسان کنترل پروژه گردآوری شد، سپس تعداد نیروی انسانی موردنیاز در فرآیند اجرا یک طبقه با مساحت ۶۰۰ مترمربع در دو سیستم، با مشارکت مسئولان اجرائی پروژه‌های ملارد، پردیس، و پرند به‌دست آمد (جدول ۷).

نیروی انسانی موردنیاز در طول دوره‌ی ۲ و ۱۶ روزه براساس نیاز دوره تعیین شده است. به فرض نیروی انسانی بتن‌ریز در ساختمان تونلی به دلیل بتن‌ریزی سقف و دیوار در یک روز، در دوره‌ی دو روزه یک بار نیاز است، در حالی‌که در ساختمان سنتی با بتن‌ریزی جداگانه‌ی سقف و دیوار در ۲ روز، نیروی بتن‌ریز در ۲ مرحله نیاز است.

لازم به ذکر است که خواب سرمایه‌ی ناشی از سرعت اجرای سیستم قالب تونلی که حدوداً سه برابر ساختمان سنتی است، در نظر گرفته نشده است؛ که خود عامل مهمی در کاهش هزینه‌ی تمام‌شده‌ی پروژه است.

۳.۴.۴. هزینه‌ی بلندمدت

هزینه‌ی بلندمدت شامل معیارهایی همچون سرعت برگشت سرمایه‌گذاری، عمر مفید و دوام، هزینه‌های تعمیر و نگهداری است. این معیارها علاوه بر هزینه‌ی مصالح و نیروی انسانی، مخارج بلندمدت اعضای تیم طراحی را هنگام انتخاب سیستم ساخت در نظر می‌گیرد.

هزینه‌های بلندمدت هنگام استفاده سیستم بتنی قالب تونلی می‌تواند کاهش یافته باشد. تراکم و عمل‌آوری خوب در این محیط کنترل شده است، این عوامل بتن با دوام بالا و متراکم را تأمین می‌کنند. به‌علاوه یکپارچگی سازه احتمال نفوذ آب، که می‌تواند سازه را تضعیف کند و باعث مشکلات لکه‌ی بدنام شوند، را کاهش داده است. به طوری‌که مزایای دوام بلندمدت، نگهداری کم در تمام عمر ساختمان‌ها جهت حفظ ظاهر اولیه، خوردگی یا از بین رفتن را دارند. این یکی از بزرگ‌ترین مزایا برای مالکانی است که نیاز به هزینه‌های بلندمدت را در طی فرآیند پروژه فهمیدند. اکثر کارشناسان معتقدند که با پذیرش سیستم قیمت‌گذاری دوره‌ی عمر، هزینه‌ی اولیه‌ی سیستم بتنی قالب تونلی به مقدار زیادی با فاکتورهای دیگر همچون: کاهش بالقوه در زمان ساخت، فعالیت‌ها و نیروی انسانی پای کار، ضایعات و منابع جبران می‌شود. در مصاحبه با یک مسئول دفتر فنی یک شرکت ساختمانی پایه‌ی یک اعلام شد که پروژه‌ی ۱۰۰۰ واحدی ساختمان تونلی در حال احداث واقع در غرب استان تهران، با ۲۱ ماه زمان قرارداد به مبلغ پیمان ۷۰۰ میلیارد ریال است. اگر این پروژه نسبت به سیستم سنتی صرفه‌جویی به مدت دو دوره (هر دوره ۲ سال با نرخ بهره ۲۵٪) داشته باشد، سود ۷۰۰ میلیارد ریال در کاهش زمان ۴ سال مطابق رابطه‌ی ۲ خواهد بود: [۱۷]

$$f = p(1+i)^n = 700 \times 10^9 (1,25)^2 = 1,093 \times 10^{12} \quad (2)$$

که در آن، p مبلغ اولیه‌ی سرمایه (اصل)، i نرخ بهره یا بازگشت سرمایه، n تعداد دوره یا سال، f مبلغ نهایی سرمایه. سود صرفه‌جویی ۴ ساله‌ی زمان $f - p = 3,937 \times 10^{11}$.

پس مطابق محاسبات فوق، از صرفه‌جویی ۴ سال زمان، ۳۹۳ میلیارد ریال سود به‌دست خواهد آمد.

کارشناسان در پاسخ به سهولت نگهداری و تعمیر معتقد بودند که به‌دلیل فعالیت‌های کمتر و سازه‌ی یکپارچه‌ی بتنی ساختمان تونلی، نگهداری راحت‌تر و به‌دلیل معماری خاص تعریف‌شده برای ساختمان و عبور تأسیسات از ضخامت سقف و دیوار و داخل داکت، سهولت نگهداری کمتر است.

۴.۴.۴. اثر معماری

وزن‌های متغیر عامل پنهان ۴ روی تنوع در طرح معماری، بهداشت و ایمنی کارگران، ارتقاء دانش فنی پیمانکاران و مصرف انرژی متمرکز شده است. بنابراین عامل پنهان ۴ اثر معماری نامیده شد.

طرح معماری حکمفرماست که طرح روی کدام ترتیب طرح دیگر وابسته است. طرح مهندسی عمران کمترین وابستگی را به طرح معماری دارد. این قابل توجیه است با این امر که کارهای مهندسی عمران اساساً با کارهای خارجی سرو کار داشته و کمتر با تغییر در طرح ساختمان تحت تأثیر قرار گرفته است. طرح تأسیسات ساختمان بیشترین وابستگی را به طرح معماری دارد، به طوری‌که دستورالعمل‌های تأسیسات ساختمان بنا بر تناسب با جانمایی ساختمان طرح شده‌اند.

است و ضایعات مصالح به آسانی دوباره استفاده شده‌اند که نتیجه در کاهش مؤثر ضایعات دارد. ضایعات مصالح ساختمانی را می‌توان در ۳ گروه طبقه‌بندی کرد: ضایعات طبیعی (ضایعات غیرقابل اجتناب)، ضایعات غیرمستقیم (کاربرد مصالح برای اهداف دیگر از آن چیزی که منظور شده است) و ضایعات مستقیم (مصالحی که به‌واسطه ایجاد شده‌اند).

اگر در یک سیستم امکان کاهش قابل توجه ضایعات ساخت وجود داشته باشد، طراحان باید کاهش ضایعات را در مرحله‌ی طراحی و سراسر طرح پروژه‌ی ساخت توجه کنند.

قیمت اغلب آیم‌ها به‌صورت مجزا (دستمزد و مصالح) برای تعداد طبقات ۵ و ۱۰ طبقه از فونداسیون تا مرحله‌ی سفت‌کاری از طریق مصاحبه با مسئول دفتر فنی یک شرکت رتبه‌یک و بحث در برآورد پروژه‌ی ۱۰۰۰ واحدی ملارد و اعمال ضرایب تعدیل فهرست بها تا سه ماهه‌ی اول ۱۳۹۰، و سپس مقایسه با هزینه‌های پروژه‌ی ۲۰۰۰۰ واحدی یک شرکت ترکیه‌یی و همچنین استعلام قیمت قالب از یک شرکت ترکیه‌یی واقع در جاده‌ی قدیم قم و یک کارخانه‌ی قالب ایرانی واقع در غرب استان تهران به‌دست آمد. براساس این اطلاعات، هزینه‌ی هر مترمربع سیستم بتنی قالب تونلی ۱۸٪ کمتر از سیستم ساخت سنتی است. هزینه‌ی کلی واحد مسکونی به محل و نمای معماری وابسته است. به هر حال هزینه‌ی قالب تونلی قابل قیاس‌تر است، هنگامی که این فاکتورهای دنبالی منظور شوند (نمودار ۳):

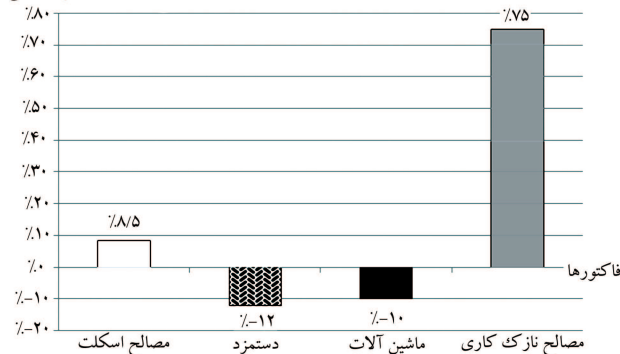
— **هزینه‌ی مصالح مصرفی:** سیستم قالب تونلی حدوداً ۸/۵٪ هزینه‌ی کمتری نسبت به اسکلت سیستم سنتی دارد.

— **دستمزد و اجرا:** با توجه به پیچیده‌تر بودن سیستم قالب تونلی و نیاز به آموزش تخصصی نیروی انسانی، دستمزد اجرای این سیستم حدود ۱۲٪ بیشتر از اسکلت سنتی است.

— **هزینه‌ی ماشین‌آلات:** سیستم قالب تونلی، اجرای هم‌زمان دیوار و سقف است که با توجه به حجم عملیات بتن‌ریزی و قالب‌های وسیع مورد استفاده در یک مرحله‌ی بتن‌ریزی، نیاز به ماشین‌آلات بیشتری است، برای ساختمان ۴ تا ۵ طبقه، این هزینه حدود ۱۴٪ و برای ساختمان ۱۰ طبقه حدود ۱۰٪ بیشتر از هزینه‌ی ماشین‌آلات در اسکلت سنتی است.

— **هزینه‌ی مصالح، اجرای دیوارها، سقف‌ها و سفیدکاری:** با توجه به اینکه بسیاری از دیوارهای ساختمان در زمان اجرای اسکلت قالب تونلی تأمین می‌شود، هزینه‌ی آن به مراتب پایین‌تر از سیستم اسکلت سنتی است (حدود ۷۵٪ کمتر از سیستم سنتی ۵ و ۱۰ طبقه است) (نمودار ۳).

صرفه‌جویی



نمودار ۳. مقایسه‌ی هزینه‌های ساختمان تونلی نسبت به سنتی.

وزن ساختمان تونلی را به ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمربع نسبت به ساختمان سنتی که ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمربع، رسانده‌اند (بتن ۳۰٪ بیشتر است، اما در عوض وزن میلگرد، سقف و تعداد فعالیت‌ها نسبت به ساختمان سنتی کمتر است). ساختمان سبک‌تر، انرژی زلزله‌ی کمتری به خود جذب می‌کند در ضمن به دلیل بتن یکپارچه در دیوار و سقف، ناپیوستگی درمحل اتصالات وجود ندارد. به همین دلیل نیروی زلزله باعث تمرکز تنش در اتصالات نمی‌شود.

بیشتر کارشناسان مقاومت لرزه‌ی ساختمان تونلی را خیلی بیشتر از ساختمان سنتی پاسخ دادند. عمده‌ترین دلایل آنها عبارت‌اند از:

- یکپارچگی بتن دیوار و سقف و نبود ناپیوستگی در این نقاط،
- سختی یکسان طبقات و صلبیت بیشتر،
- منظم بودن سازه،
- تجربه‌ی زلزله‌های پیشین از جمله زلزله‌ی سال ۱۹۹۸ ترکیه.

۵. نتیجه‌گیری

فهرست معیارها برای کمک به شاغلان ساخت در انتخاب سیستم‌های ساخت مناسب در ساختمان بتنی معین با ارزش است. این تحقیق بر پایه‌ی زمان، هزینه و کیفیت و احتیاجات ذی‌نفعان مختلف پروژه، ۲۳ معیار اجرایی را شناسایی کرد که شامل ۳ معیار زمان، ۱۰ معیار هزینه و ۱۰ معیار کیفیت است. تحلیل رتبه‌بندی مشخص کرد که معیارها در سطوح اهمیت بالا، متوسط - بالا، متوسط و کم - متوسط در انتخاب سیستم ساخت مشخص شده‌اند. کلاً ۳ معیار در سطح اهمیت بالا مشخص شده بودند: سرعت اجرا، هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت، زمان بهینه‌ی اجرا؛ ۹ معیار شامل ۴ معیار هزینه و ۵ معیار کیفیت با سطح اهمیت متوسط - بالا ثبت شده‌اند. اگرچه صرفه‌جویی زمان و هزینه به‌عنوان مهم‌ترین معیار در انتخاب سیستم ساخت مشخص شده‌اند؛ اما ملاحظات کیفیت، به‌طور فزاینده مهم بودند.

تحلیل داده‌های عوامل، کلاً ۵ عامل پنهان از معیارها را به‌دست آورده است. ۳ تا از این عوامل تحت گروه اقتصادی هستند: هزینه‌ی بلندمدت، قابلیت ساخت، هزینه‌ی اولیه، و ۲ عامل به گروه کیفیت تعلق دارند: اثر معماری و سازه. میان ۵ عامل، کیفیت و هزینه‌ی اولیه‌ی معیارهای متقاضیان پروژه‌های سنتی هستند. روندها نشان داد که متقاضیان در حال تغییر تفکرشان هستند و هنگام انتخاب سیستم ساخت، هزینه‌ی بلندمدت را در اصل و فرع انتخاب در نظر می‌گیرند. قابلیت ساخت معیاری است که پیمانکاران ممکن است به آن بیشترین درصد را بدهند، در حالی که ممکن است مهندسان معمار، اثر معماری را بالاترین ارزش بدانند. اثر بهداشتی و ایمنی و مصرف انرژی از برجسته‌ترین ویژگی‌ها در تأییدیه هستند و حالا برای همه‌ی دست‌اندرکاران پروژه اهمیتی دوچندان دارد. این تحقیق نشان داد که در حال حاضر، تأکید صنعت ایران روی انتخاب سیستم ساخت و شناسایی ۵ بعد معیارهاست، که کمک‌کننده‌ی دست‌اندرکاران ساخت در انتخاب یک سیستم مناسب است. معیارهای پیشنهادی، هر دو عامل قوی و ضعیف را شامل شده است؛ برای اینکه احتمال دارد تصرف بهتری از اجرای بالقوه‌ی سیستم‌های ساخت در مقابل سنجش‌های متداول زمان، هزینه، و کیفیت داشته باشند. سیستم ساخت بهینه باید همه‌ی ذینفعان پروژه را سود ببخشد. در ادامه‌ی این تحقیق، می‌توان برای کمک به توسعه‌ی ابزارهای مکانیزه بر پایه‌ی معیارها، پژوهش‌هایی برای سطح تصمیمات پروژه راجع به استراتژی‌های ساخت انجام داد.

در طی مطالعات میدانی، کارشناسان دفاتر فنی پروژه‌های ساختمان تونلی تأکید داشتند که داشتن این اطلاعات اضافی مورد نیاز است:

- احتیاجات اطلاعات خارجی: گزارش امکان‌پذیری از پیش‌سازندگان،
- احتیاجات اطلاعات خارجی: ظرفیت سیستم حمل‌ونقل،
- انبار کارگاه پای کار برای قطعات پیش‌ساخته و قالب،
- اطلاعات طرح دیوار پانلی پیش‌ساخته‌ی خارجی،
- اطلاعات طرح پلکان پیش‌ساخته،
- جزئیات نصب قطعات پیش‌ساخته.
- اکثر کارشناسان بر این باورند که تأمین پارکینگ در سیستم نوین سیستم بتنی قالب تونلی دشوار است. عمده‌ترین دلایل آنها عبارتند از:
- سلولی بودن ساختمان و مانور کم به دلیل دیوار برشی‌های متعدد،
- عدم هم‌خوانی فاصله‌ی دیوارها با ضوابط و قوانین شهرداری،
- عدم توجیه اقتصادی برای ساختمان‌های کمتر از ۱۰ طبقه،
- عدم توجیه اقتصادی گودبرداری در زمین‌های دژ.

در سیستم بتنی قالب تونلی، ذینفعان اصلی پروژه همچون مالکان، مهندسان، پیمانکاران و پیمانکاران جزء، معمولاً انرژی زیادی روی طرح پروژه می‌گذارند. سطح بالای محیط طرح گروهی به ارتقاء دانش و کمتر شدن نواقص کمک کرده است. به هر حال در مصاحبه‌ها برخی پاسخگویان بحث کرده‌اند، که در زمانی که سیستم نظارت کیفیت جدی اجرا شده است، کیفیت خروجی سیستم ساخت سنتی کمتر از سیستم بتنی قالب تونلی نیست. با وجود این، ما نمی‌توانیم انکار کنیم که محیط ساخت بهتر همچون کارگاه تولید، تضمینی برای کیفیت بالاتر نیست.

سیستم بتنی قالب تونلی به علت محیط‌های کاری ایمن و پاکیزه‌تر، بهداشت و ایمنی نیروی انسانی را بهبود می‌بخشد. اجزای پیش‌ساخته (دیوارهای پیش‌ساخته، مصالح نازک‌کاری و...) در محیط کنترل‌شده‌ی کارخانه با مصالح خشک ساخته شده‌اند، و سطح رطوبت پایین در ساختمان‌های جدید با ریسک کمتر سلامتی ساکنان مرتبط است. این سیستم با کاربرد قابل توجه پیش‌سازی، کمک قابل توجهی به کاهش فعالیت‌ها و مدت ساخت درجاست، بنابراین کاهش قطعی در عوامل مزاحم همچون سرو صدای ساخت، گرد و خاک، آلودگی نورو دیگر آلودگی‌ها توسط این گروه وجود دارد. به‌علاوه تردد‌های حمل و نقل مکرر مصالح و تجهیزات برای محل‌های ساخت نیاز است، که ترافیک کامیون‌ها، موقعیت جاده‌ی شلوغ را پیش از این می‌افزایند.

ساختمان‌های تونلی مزایای عمده‌ی دوره‌ی عمر ساختمان‌ها دارند. با آگاهی افزایش یافته از گازهای گلخانه‌ی، گرمای جهانی و کمیابی انرژی، الگوی مصرف انرژی می‌تواند یک دستورالعمل بهبود اجرایی مهم در ساخت باشد.

۵.۴.۴. اثر سازه

معیارهای اجرایی در این گروه مرتبط با سبک‌سازی و رفتار و مقاومت سیستم در برابر زلزله است. بنابراین، این عامل اثر سازه نامیده شده است.

با نگاه به زلزله‌های دهه‌های اخیر در کشورهای دارای فناوری نوین ساختمان تونلی و آمار خرابی‌ها دیده می‌شود که ساختمان‌های تونلی در برابر بزرگی زلزله، مقاومت خوبی از خود نشان داده‌اند؛ مطمئناً آیت‌های سبکی و یکپارچگی سلولی ساختمان‌های تونلی نسبت به ساختمان‌های سنتی از عوامل مهم مقاومت بوده است.^[۱۸] کشورهای که دارای تجربه و دانش این صنعت هستند با طراحی بهینه،

پانوشتها

1. kaiser-meyer-olkin measure of sampling adequacy
2. Bartlett's test
3. prefabrication, preassembly, modularization and offsite fabrication
4. hybrid concrete construction

منابع (References)

1. Iran construction projects Management Co. (MAPSA), "Industrialization Roadmap of Building and Housing", (In persain) (2010).
2. Movahedian, M and Kalali, A. "Modern Constructional Technologies", Building and Housing research center, 5th edition, (In Persain) (2009).
3. Svetlana, B. and Marjorie, G. "The web-based world housing encyclopediaA: Housing construction in high seismic risk areas of the world", *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver*, B.C., Canada, Paper No. 1677, (1-6 August 2004).
4. The Concrete Centre, *High Performance Buildings Using Tunnel Form Concrete Construction*, The Concrete Centre, Camberley, TCC04/02, pp. 1-8 (2004).
5. Tunnel Forms by Outinord, Paper No. 1-7 (2008).
6. Idrus, A.B. and Newman, J.B. "Construction related factors influencing the choice of concrete floor systems", *Construction Management and Economics*, **20**, pp. 13-19 (2002).
7. Tatum, C.B., Vanegas, J.A. and Williams, J.M. "Constructability improvement using prefabrication, preassembly, and modularization", Construction Industry Institute, Austin, Tex (1987).
8. Song, J.C., Fagerlund, W.R., Haas, C.T., Tatum, C.B. and Vanegas, J.A. "Considering prework on industrial projects", *Journal of Construction Engineering and Management*, **131**(6), pp. 723-733 (2005).
9. Barrett, P. "Document current business processes and desirable process improvements (work package 3)", *Hybrid Concrete Construction for the UK Market: Final Report on Research into Using Combinations of In-Situ and Precast Concrete in Structural Frames to Achieve Better Value for UK Customers*, Reinforced Concrete Council, Crowthorne, Berkshire (2001).
10. Glass, J. and Baiche, B. "Perceptions of hybrid concrete construction in the UK construction industry", *Engineering, Construction, and Architectural Management*, **8**(1), pp. 67-77 (2001).
11. Soetanto, R., Dainty, A.R.J., Glass, J. and Price, A.D.F. "Empirical evaluation of structural frame performance criteria: Realizing the potential of hybrid concrete construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, **132**(3), pp. 278-290 (2006).
12. Tavafoghi, A. and Eshghi, S. "Seismic Behaviour of Tunnel Form Concrete Building Structures", The 14 th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China (12-17 October 2008).
13. Jaillon, L. and Poon, C.S. "Sustainable construction aspects of using prefabrication in dense urban environment: a Hong Kong case study", *Construction Management and Economics*, **26**(9), pp. 953-966 (2008).
14. Jaillon, L. and Poon, C.S. "The evolution of prefabrication residential building systems in Hong Kong: A review of the public and the private sector", *Automation in Construction*, **18**(3), pp. 239-248 (2009).
15. Kameli, M. "The comparison between the Housing projects constructed with tunnel forming and modular from the point of cost, Time and quality in Tehran province", Master's thesis, Science and research branch Islamic Azad University, (In Persain) (2011).
16. Baldwin, A. and Poon, C.S. "Designing out waste in high-rise residential buildings: Analysis of precasting methods and traditional construction", *Journal of Renewable Energy*, **34**(9), PP. 2067-2073, (2009).
17. R. Dornbusch, S. Fischer, "Macroeconomics translators: Y. Dadgar, M. Monjazab", published by Asim publications, 7th Edition, (In Persain) (2009).
18. World Housing Encyclopedia an Encyclopedia of Housing Construction in Seismically Active Areas of the World.