بررسی تحلیلی فناوری های ساخت سازه های حجمی بتنی پیش ساخته با استفاده از مدل تصمیم گیری چند معیاره ویکور

فتاح پیرویان - مهدی پیرویان – کامبیز عالمپور
۱- رئیس هیات مدیره شرکت مهندسی سازان ، info@mohandesisazan.com
۲- مدیرعامل شرکت مهندسی سازان، info@mohandesisazan.com
۳- مدیر واحد تحقیق و توسعه شرکت شیراز اسکان ؛ alempour@yahoo.com

چکیده

این تحقیق به ارزیابی و انتخاب بهینه قالب‌های مورد استفاده در تولید ماژول‌های بتنی در سیستم ساخت صنعتی PPVC (Prefabricated Prefinished Volumetric Construction) می‌پردازد. با توجه به نقش کلیدی قالب در کیفیت، سرعت و هزینه تولید، انتخاب مناسب‌ترین طرح قالب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش سه طرح مختلف شامل Zindadi، FEZHM و Haitian مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. برای انجام ارزیابی، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر وزن‌دهی استفاده شده است تا امکان مقایسه همزمان معیارهای فنی، اقتصادی و عملیاتی فراهم شود. با توجه به هزینه های بالای ساخت قالب لازم است تا در زمان انتخاب پیکره بندی و عملکرد قالب از یک معیار مناسب برای بررسی همزمان چندین معیار فنی، اقتصادی و عملیاتی استفاده شود. عواملی مانند هزینه تولید، کیفیت محصول، زمان چرخه تولید، مصرف انرژی، قابلیت اطمینان تجهیزات و میزان ضایعات از جمله معیارهایی هستند که به طور همزمان در انتخاب یک روش تولید مناسب نقش دارند.در ابتدا مجموعه‌ای از معیارهای مؤثر در انتخاب قالب شامل قیمت و وزن، تجهیزات هیدرولیک، سیستم کیورینگ، طول عمر، دقت و کیفیت ساخت، سیکل تکرار تولید، اتوماسیون، ایمنی، نگهداری و کاهش ضایعات شناسایی و تعریف شد. سپس با استفاده از قضاوت کارشناسی، به هر معیار وزن نسبی اختصاص یافت. امتیاز عملکردی هر یک از سه طرح در تمامی معیارها تعیین شد و امتیاز نهایی آن‌ها از طریق مدل مجموع وزنی محاسبه گردید.به منظور بررسی پایداری نتایج، چهار سناریوی مختلف وزن‌دهی طراحی شد تا اثر تغییر اولویت‌های تصمیم‌گیری بر رتبه‌بندی گزینه‌ها تحلیل شود. نتایج نشان داد که در تمامی سناریوهای مورد بررسی، طرح Zindadi بالاترین امتیاز نهایی را کسب کرده و در رتبه نخست قرار گرفته است. طرح Haitian در تمامی حالات رتبه دوم و طرح FEZHM رتبه سوم را به خود اختصاص داده‌اند.برتری طرح Zindadi عمدتاً ناشی از عملکرد بهتر آن در معیارهای کلیدی مانند دقت و کیفیت ساخت، سرعت تولید، استحکام قالب و سطح اتوماسیون بوده است. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که تغییر وزن معیارها تأثیر معناداری بر ترتیب نهایی گزینه‌ها نداشته و نتایج از پایداری بالایی برخوردار است. در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند چارچوبی نظام‌مند و قابل اعتماد برای انتخاب قالب در سیستم‌های ساخت صنعتی فراهم کند و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، طرح Zindadi به عنوان گزینه برتر پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ساحت قطعات بتنی پیش ساخته- قالبهای -PPVC - تصمیم گیری چند معیاره ویکور

مقدمه :

روش ساخت «Prefabricated Prefinished Volumetric Construction (PPVC)» به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوین در صنعتی‌سازی ساختمان، نقش مهمی در افزایش سرعت، کیفیت و بهره‌وری پروژه‌های عمرانی ایفا می‌کند. در این روش، واحدهای ساختمانی به‌صورت ماژول‌های سه‌بعدی کامل در کارخانه تولید و پس از تکمیل به محل پروژه منتقل می‌شوند(شکل ۱) . این ماژول‌ها معمولاً شامل سیستم سازه‌ای، دیوارها، سقف، کف، تأسیسات مکانیکی و الکتریکی و حتی اجزای داخلی ساختمان هستند که قبل از نصب نهایی در کارخانه تکمیل می‌شوند. توسعه فناوری PPVC پاسخی به مشکلات روش‌های سنتی ساخت‌وساز از جمله اتلاف مصالح، زمان طولانی اجرا، وابستگی زیاد به نیروی انسانی و کنترل محدود کیفیت بوده است (Gibb, 1999). امروزه بسیاری از کشورهای صنعتی از جمله سنگاپور، بریتانیا، ژاپن و چین از این فناوری برای اجرای پروژه‌های انبوه‌سازی، هتل‌ها، بیمارستان‌ها و ساختمان‌های مرتفع استفاده می‌کنند (Building and Construction Authority, 2020).

شکل ۱- ساخت سازه های حجمی بتنی پیش ساخته روشی مهندسی و خلاقانه در زمینه تولید انبوه ساختمان می باشد

اساس عملکرد سیستم PPVC بر تولید صنعتی اجزای ساختمانی در محیط کارخانه استوار است. در این فرآیند ابتدا ساختمان به مجموعه‌ای از واحدهای مدولار تقسیم می‌شود و سپس هر واحد به‌صورت جداگانه طراحی و تولید می‌گردد. استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در این مرحله اهمیت فراوانی دارد زیرا امکان هماهنگی کامل میان بخش‌های معماری، سازه‌ای و تأسیساتی را فراهم می‌سازد و از بروز خطاهای اجرایی جلوگیری می‌کند (Sidwell, 2011 & Pan). پس از نهایی شدن طراحی، عملیات ساخت ماژول‌ها آغاز می‌شود. این عملیات شامل ساخت قاب سازه‌ای، نصب دیوارها، اجرای تأسیسات، نصب پنجره‌ها و تکمیل نهایی داخلی است. انجام این فرآیندها در محیط کارخانه موجب می‌شود شرایط تولید تحت کنترل دقیق قرار گیرد و کیفیت نهایی محصول افزایش یابد (Lawson et al., 2014).یکی از مهم‌ترین مزایای روش PPVC کاهش قابل توجه زمان اجرای پروژه است. در سیستم‌های سنتی، عملیات مختلف ساختمانی به‌صورت متوالی انجام می‌شود، اما در روش PPVC تولید ماژول‌ها در کارخانه هم‌زمان با آماده‌سازی محل پروژه صورت می‌گیرد. این موضوع موجب کاهش مدت زمان ساخت تا حدود ۴۰ درصد می‌شود (Smith, 2016). علاوه بر این، استفاده از فناوری پیش‌ساخته حجمی موجب کاهش نیاز به نیروی انسانی در محل پروژه و در نتیجه افزایش ایمنی کارگاه می‌شود. بسیاری از فعالیت‌های پرخطر ساختمانی مانند قالب‌بندی، بتن‌ریزی در ارتفاع و نصب تأسیسات در کارخانه انجام می‌شود که دارای شرایط ایمنی کنترل‌شده‌تری است (Gibb, 2007 & Goodier).از جنبه زیست‌محیطی نیز فناوری PPVC مزایای چشمگیری دارد. در روش‌های سنتی ساخت مقدار زیادی ضایعات ساختمانی تولید می‌شود، در حالی که تولید صنعتی ماژول‌ها امکان استفاده بهینه از مصالح و بازیافت مواد را فراهم می‌سازد. مطالعات نشان داده‌اند که فناوری‌های پیش‌ساخته می‌توانند میزان ضایعات ساختمانی را تا حدود ۵۰ درصد کاهش دهند (Poon, 2009 & Jaillon). همچنین کاهش فعالیت‌های ساختمانی در محل پروژه موجب کاهش آلودگی صوتی، گردوغبار و ترافیک شهری می‌شود که این موضوع در پروژه‌های شهری اهمیت ویژه‌ای دارد (Lu & Yuan, 2013).با وجود مزایای فراوان، اجرای سیستم PPVC با چالش‌هایی نیز همراه است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها محدودیت‌های حمل‌ونقل ماژول‌های حجیم است. ابعاد و وزن ماژول‌ها باید با استانداردهای حمل جاده‌ای و ظرفیت تجهیزات بالابری سازگار باشد، به همین دلیل طراحی ماژول‌ها نیازمند برنامه‌ریزی دقیق است (Lawson et al., 2012). همچنین سرمایه‌گذاری اولیه برای ایجاد کارخانه‌های تولید ماژول و خرید تجهیزات تخصصی نسبتاً بالا است که ممکن است در کوتاه‌مدت هزینه‌های پروژه را افزایش دهد. با این حال، در پروژه‌های بزرگ و انبوه‌سازی، کاهش زمان اجرا و هزینه‌های نیروی انسانی معمولاً این هزینه اولیه را جبران می‌کند (Hewage, 2016 & Kamali).فناوری PPVC همچنین نقش مهمی در توسعه ساخت‌وساز پایدار دارد. امروزه بسیاری از کشورها به دنبال کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار کربن و افزایش بهره‌وری منابع در صنعت ساختمان هستند. ساخت صنعتی و مدولار می‌تواند به بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها، کاهش مصرف مصالح و کنترل بهتر کیفیت کمک کند (Mao et al., 2015). به همین دلیل، بسیاری از سیاست‌گذاران حوزه ساخت‌وساز از فناوری‌های مدولار و پیش‌ساخته به‌عنوان بخشی از راهبرد توسعه پایدار حمایت می‌کنند. روش ساخت PPVC را می‌توان یکی از مهم‌ترین تحولات صنعت ساختمان در عصر مدرن دانست. این فناوری با انتقال بخش عمده عملیات ساخت به کارخانه، امکان افزایش کیفیت، کاهش زمان اجرا، کاهش ضایعات و بهبود ایمنی را فراهم می‌سازد. با پیشرفت فناوری‌های طراحی دیجیتال، اتوماسیون صنعتی و سیستم‌های حمل‌ونقل، انتظار می‌رود استفاده از PPVC در سال‌های آینده گسترش بیشتری پیدا کند و به یکی از روش‌های اصلی ساخت‌وساز در پروژه‌های بزرگ تبدیل شود.

۲- عملکرد ساختاری و روش ساخت در قالبهای PPVC

قالب‌ها معمولاً قالب‌های فلزی (فولادی) و قابل تکرار هستند که برای تولید تعداد زیادی ماژول با ابعاد یکسان طراحی می‌شوند. این قالب‌ها شامل قالب کف، دیوارها و سقف ماژول هستند و به‌گونه‌ای ساخته می‌شوند که دقت ابعادی بالا و سطح بتن با

کیفیت مناسب فراهم شود. در بسیاری از کارخانه‌ها قالب‌ها به‌صورت قالب‌های مدولار یا قابل تنظیم طراحی می‌شوند تا امکان تولید چند نوع ماژول با تغییرات محدود در ابعاد وجود داشته باشد.ابتدا قالب‌ها در کارخانه مونتاژ و آماده‌سازی می‌شوند و سطح داخلی آن‌ها با مواد رهاساز قالب پوشانده می‌شود. سپس آرماتوربندی و قطعات مدفون مانند صفحه‌های اتصال، لوله‌های تأسیسات و محل عبور کابل‌ها در داخل قالب قرار می‌گیرند. بعد از آن بتن در قالب ریخته شده و با ویبره متراکم می‌شود تا حباب‌های هوا خارج شوند و بتن به‌طور کامل قالب را پر کند. پس از رسیدن بتن به مقاومت اولیه، قالب باز شده و ماژول بتنی خارج می‌شود. در مرحله بعد عملیات تکمیلی مانند نصب درها، پنجره‌ها، پوشش داخلی، تجهیزات تأسیساتی و نازک‌کاری در کارخانه انجام می‌گیرد. در نهایت ماژول آماده‌شده به محل پروژه منتقل و با جرثقیل در جای خود نصب می‌شود.استفاده از قالب‌های دقیق در این سیستم باعث افزایش کیفیت سطح بتن، کاهش خطاهای اجرایی و امکان تولید انبوه ماژول‌ها می‌شود.

۳- اهمیت روش تصمیم گیری چند معیاره ویکور در انتخاب ساختار قالب

با توجه به هزینه های بالای ساخت قالب لازم است تا در زمان انتخاب پیکره بندی و عملکرد قالب از یک معیار مناسب برای بررسی همزمان چندین معیار فنی، اقتصادی و عملیاتی استفاده شود. عواملی مانند هزینه تولید، کیفیت محصول، زمان چرخه تولید، مصرف انرژی، قابلیت اطمینان تجهیزات و میزان ضایعات از جمله معیارهایی هستند که به طور همزمان در انتخاب یک روش تولید مناسب نقش دارند. از آنجا که این معیارها در بسیاری از موارد با یکدیگر در تعارض هستند، استفاده از روشهای تصمیم گیری چند معیاره به عنوان یک ابزار علمی برای تحلیل و انتخاب گزینه مناسب اهمیت زیادی پیدا کرده است (Zavadskas, Turskis, 2011). یکی از روشهای شناخته شده در حوزه تصمیم گیری چندمعیاره، مدل ویکور است که برای انتخاب بهترین گزینه از میان چندین گزینه بر اساس مفهوم راه حل سازشی ارائه شده است. این روش نخستین بار توسط اوپریکوویچ توسعه داده شد و بعدها با همکاری تزنگ گسترش یافت (Opricovic & Tzeng, 2004). هدف اصلی روش ویکور تعیین گزینهای است که نزدیکترین فاصله را با راه حل ایده آل داشته باشد و در عین حال تعادلی مناسب میان حداکثررضایت جمعی و حداقل نارضایتی فردی برقرار کند.در روش ویکور ابتدا یک ماتریس تصمیم شامل گزینه ها و معیارهای ارزیابی تشکیل میشود وبرای هر معیار وزن اهمیتی در نظر گرفته میشود. سپس برای هر معیار بهترین مقدار و بدترین مقدارمشخص میگردد. در ادامه دو شاخص اصلی برای هر گزینه محاسبهمیشود: شاخص S که بیانگر میزان مطلوبیت کلی گزینه است و شاخص R که بیشترین میزان نارضایتی در میان معیارها را نشان میدهد.(Opricovic,1989)

روابط محاسباتی این شاخص ها به صورت زیر است:

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} \frac{w_i(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)}$$

$$R_j = \max_{i=1}^{n} \left[\frac{w_i(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \right]$$

در این روابط wi وزن معیار fij ، iمقدار عملکرد گزینه j در معیار fi* ، iبهترین مقدار وfi− بدترین مقدار معیار هستند. پس از محاسبه این دو شاخص، شاخص نهایی Q برای رتبه بندی گزینه ها محاسبه میشود که ترکیبی از دو معیار مطلوبیت گروهی و حداقل نارضایتی فردی است:

$$Q_j = v\frac{(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1-v)\frac{(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)}$$

در این رابطه v پارامتر استراتژی تصمیم گیری است که معمولاً مقدار آن 0.5در نظر گرفته میشود و بیانگر اهمیت نسبی مطلوبیت جمعی در مقابل حداقل نارضایتی فردی است .(Opricovic & Tzeng, 2004)همچنین S* و S− به ترتیب بهترین و بدترین مقدار شاخصS و R* و R− بهترین و بدترین مقدار شاخص R هستند. در نهایت گزینه ای که کمترین مقدار Q را داشته باشد به عنوان گزینه برتر انتخاب میشود..در سالهای اخیر، مدل ویکور کاربرد گسترده ای در حوزه مهندسی تولید و بهینه سازی فرآیندهای ساخت پیدا کرده است. این روش برای انتخاب بهترین فرآیند ماشینکاری، انتخاب فناوری مناسب تولید، تعیین مواد بهینه برای قطعات مهندسی، طراحی قالبهای صنعتی و همچنینارزیابی گزینه های مختلف در خطوط تولید مورد استفاده قرار گرفته است. در چنین مسائلی معیارهایی مانند هزینه تولید، کیفیت سطح قطعه، زمان چرخه تولید، مصرف انرژی، قابلیت اتوماسیون و طول عمر تجهیزات به طور همزمان مورد بررسی قرار میگیرند . (Zavadskas & Turskis, 2011)استفاده از روش ویکور به مهندسان کمک میکند تا با در نظر گرفتن همزمان همه معیارها، گزینه ای را انتخاب کنند که بهترین تعادل را میان معیارهای مختلف ایجاد کند.به طور کلی، روش ویکور به دلیل ساختار تحلیلی مناسب و توانایی آن در حل مسائل تصمیم گیری با معیارهای متعدد و متعارض، به عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در انتخاب و بهینه سازی سیستمهای تولید قالبهای PPVC مورد استفاده قرار گرفته است تا در شرایط پیچیده تصمیم گیری به شکل علمی و مبتنی بر داده انجام گیرد و بهترین گزینه از میان چندینگزینه موجود انتخاب شود.

۴- بررسی مدلهای عملکردی قالب و پارامترهای مهم مهندسی

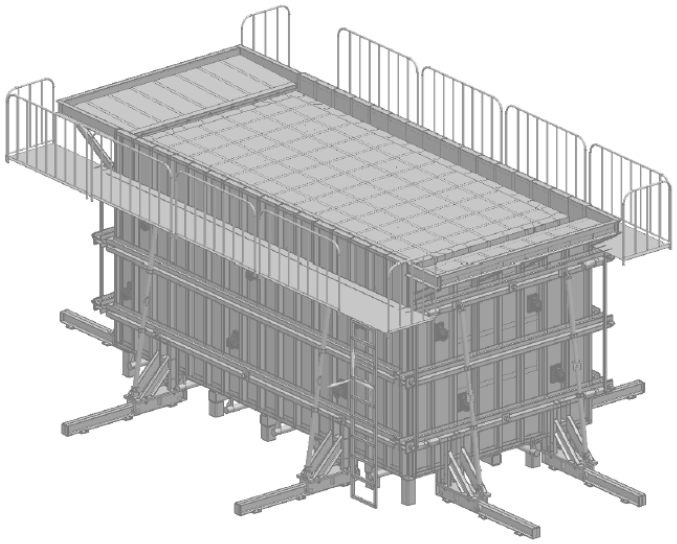
در این تحقیق سه نمونه الگوی قالب مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است . نمونه اول مربوط به طراحی شرکت xindadiکه به صورت اتوماتیک طراحی شده است و کلیه بخشها و موارد فنی این قالبها در ۱۴ آیتم اساسی مورد وزن بندی قرار گرفته است (جدول ۱) . پس از تعیین معیارها، برای هر معیار ضریب اهمیت یا وزن در نظر گرفته شد به‌گونه‌ای که مجموع وزن‌ها برابر با یک (یا صد درصد) باشد. این وزن‌ها بیانگر میزان تأثیر هر معیار در تصمیم‌گیری نهایی هستند. در گام بعدی سه طرح مختلف قالب شامل مدل شرکت Zindadi، مدل شرکت FEZHM و مدل شرکت Haitian مورد ارزیابی قرار گرفتند. هر یک از این گزینه‌ها بر اساس هر معیار امتیازدهی شدند. امتیازدهی در یک مقیاس یکسان (به‌عنوان مثال از ۱ تا ۵) انجام شد تا امکان مقایسه مستقیم بین گزینه‌ها فراهم گردد.برای محاسبه امتیاز نهایی هر گزینه، از رابطه مجموع وزنی استفاده شد. در این روش امتیاز هر گزینه در هر معیار در وزن همان معیار ضرب شده و سپس مجموع این مقادیر به‌عنوان امتیاز نهایی گزینه در نظر گرفته می‌شود.

جدول۱- معیارهای وزن دهی متقاوت در چهار حالت بر اساس مدل ویکور جهت سه نمونه قالب PPVC

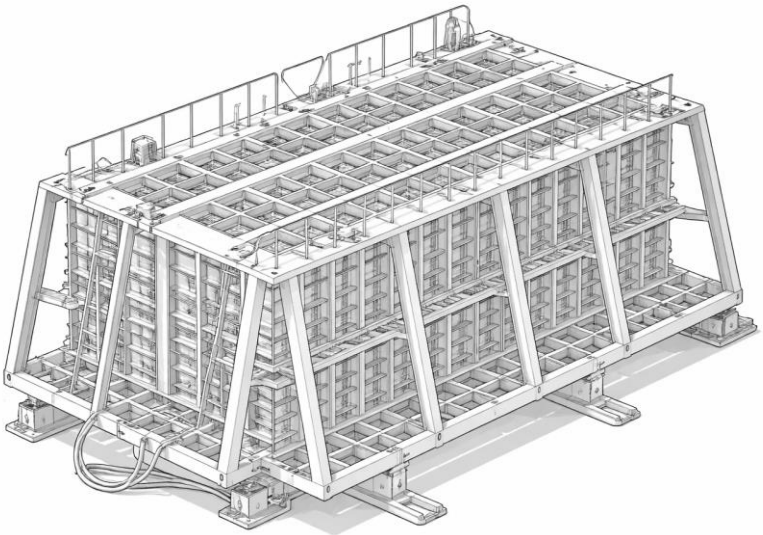
معیار	حالت چهارم	حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	Shindadi	FEZHM	Haitian
قیمت و وزن پایین	7	12	7	10	3	5	4
تجهیزات هیدرولیک	6	6	6	6	5	2	4
سیستم کیورینگ	6	6	6	6	5	2	4
طول عمر قالب	10	10	10	10	5	3	4
تعمیرات و فاکتورهای ترمیم	6	6	6	6	4	4	4
دقت و کیفیت ساخت	10	10	12	10	5	3	4
باز و بسته شدن مناسب	5	5	5	5	5	3	4
سیکل تکرار ساخت	10	10	12	10	5	2	4
قطعات مصرفی در قالب	5	5	5	5	5	3	4
استحکام و مقاوت قالب	7	7	7	7	5	3	4
اتوماسیون و راحتی کار	8	6	8	8	5	1	3
ایمنی قالب	5	5	5	5	5	3	4
نگهداری مناسب	4	4	4	4	4	4	4
کاهش ضایعات حین تولید	10	8	12	4	5	2	4

اعداد وزنی در این جدول بر اساس **روش تصمیم‌گیری چندمعیاره با وزن‌دهی کارشناسی (Expert-based weighting)** تعیین شده‌اند. در این رویکرد ابتدا اهمیت نسبی هر معیار در عملکرد سیستم تولید قالب ارزیابی می‌شود و سپس برای هر معیار یک وزن در مقیاس عددی مشخص اختصاص داده می‌شود. در این روش ابتدا معیارهای مؤثر در انتخاب قالب برای تولید ماژول‌های بتنی شناسایی می‌شوند که شامل عوامل اقتصادی، فنی، عملیاتی و ایمنی است. پس از تعیین معیارها، اهمیت نسبی هر معیار نسبت به سایر معیارها با توجه به تأثیر آن بر کیفیت محصول، سرعت تولید، هزینه‌های بهره‌برداری و دوام قالب ارزیابی می‌شود. معیارهایی که نقش اساسی‌تری در عملکرد سیستم تولید دارند، وزن بیشتری دریافت می‌کنند. به عنوان مثال معیارهایی مانند دقت و کیفیت ساخت، سیکل تکرار تولید، طول عمر قالب و کاهش ضایعات به دلیل تأثیر مستقیم بر بهره‌وری تولید و کیفیت محصول دارای وزن‌های بالاتر هستند. در مقابل، معیارهایی مانند نگهداری، قطعات مصرفی و سهولت باز و بسته شدن قالب با وجود اهمیت عملیاتی، تأثیر کمتری بر عملکرد کلی سیستم دارند و بنابراین وزن کمتری به آن‌ها اختصاص داده شده است. علاوه بر این، برای بررسی پایداری نتایج تصمیم‌گیری، چند سناریوی متفاوت

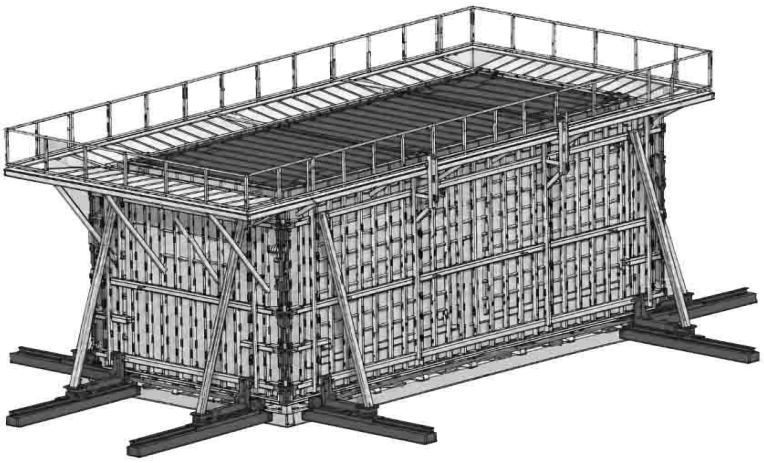
وزن‌دهی تعریف شده است. در این سناریوها برخی معیارها با توجه به اولویت‌های متفاوت تصمیم‌گیرنده دارای وزن بیشتر یا کمتر شده‌اند. این فرآیند که به عنوان تحلیل حساسیت شناخته می‌شود، امکان بررسی تأثیر تغییر اهمیت معیارها بر رتبه‌بندی گزینه‌ها را فراهم می‌کند و به ارزیابی میزان پایداری نتایج کمک می‌کند. به این ترتیب وزن‌های ارائه‌شده منعکس‌کننده اهمیت نسبی معیارها در شرایط مختلف تصمیم‌گیری هستند.



شکل ۱- طرح قالب PPCV متعلق به گروه تولیدی XINDADI به صورت فول اتوماتیک (جکهای هیدرولیک) و ماژول تغییر ضخامت دیواره و ارتفاع دیوار در نظر گرفته شده است



شکل ۲- طرح قالب PPCV متعلق به گروه تولیدی XINDADI به صورت فول اتوماتیک (جکهای هیدرولیک) و ماژول تغییر ضخامت دیواره



شکل ۳- طرح قالب PPCV متعلق به گروه تولیدی FEZHM به صورت کاملا دستی و بدون جک هیدرولیک برقی – بدون ماژول تغییر ضخامت دیواره

تحلیل نتایج :

در این پژوهش به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین طرح قالب، از یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر وزن‌دهی معیارها استفاده شد. در ابتدا مجموعه‌ای از معیارهای فنی و عملیاتی که بر عملکرد قالب و کیفیت تولید تأثیرگذار هستند شناسایی گردید. این معیارها شامل وزن و قیمت تمام‌شده قالب، استفاده از تجهیزات هیدرولیک و تجهیزات جانبی مناسب، وجود سیستم کیورینگ در داخل قالب، افزایش طول عمر تولید قطعات، سهولت تعمیرات و اصلاح قالب، دقت ابعادی و کیفیت سطح قطعات تولیدی، سهولت باز و بسته شدن قالب، کاهش زمان سیکل تولید، قابلیت تعویض قطعات مصرفی قالب، مقاومت در برابر سایش و خوردگی، امکان اتوماسیون و یکپارچه‌سازی با خط تولید، ایمنی در زمان بهره‌برداری، سهولت نگهداری و سرویس، کاهش ضایعات تولید و قابلیت تولید در تیراژ بالا می‌باشند. ارزیابی گزینه‌های مختلف قالب با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و با در نظر گرفتن چهار سناریوی متفاوت وزن‌دهی انجام شد تا تأثیر تغییر اهمیت معیارها بر نتیجه نهایی بررسی شود. در این تحلیل سه گزینه شامل طرح‌هایZindadi ، FEZHMو Haitian مورد مقایسه قرار گرفتند. برای هر یک از گزینه‌ها امتیاز عملکردی در هر معیار تعیین شد و سپس با استفاده از وزن‌های تعریف‌شده در هر سناریو، امتیاز نهایی گزینه‌ها از طریق جمع حاصل‌ضرب وزن معیارها در امتیاز هر گزینه محاسبه شد(جدول ۲).در حالت اول که وزن‌ها در وضعیت متعادل و نزدیک به شرایط پایه در نظر گرفته شدند، طرح Zindadi با کسب امتیاز ۴۶۳ بیشترین امتیاز را به دست آورد و در رتبه اول قرار گرفت. در این حالت طرح Haitian با امتیاز ۳۸۴ در رتبه دوم و طرح FEZHM با امتیاز ۲۷۶ در رتبه سوم قرار گرفت. برتری طرح Zindadi در این سناریو عمدتاً ناشی از عملکرد بهتر آن در معیارهای مهمی مانند دقت و کیفیت ساخت، سیکل تکرار تولید، اتوماسیون و استحکام قالب بود.در سناریوی دوم وزن برخی معیارهای اقتصادی و عملیاتی مانند قیمت و کاهش ضایعات افزایش داده شد تا تأثیر این عوامل بر انتخاب نهایی بررسی شود. در این حالت نیز طرح Zindadi با امتیاز ۴۶۸ همچنان بیشترین امتیاز را کسب کرد و در رتبه اول باقی ماند. در این سناریو طرح Haitian با امتیاز ۳۹۴ در رتبه دوم و

طرح FEZHM با امتیاز ۲۹۱ در رتبه سوم قرار گرفت. نتایج این حالت نشان داد که حتی با افزایش اهمیت معیارهای اقتصادی، برتری فنی طرح Zindadi همچنان موجب حفظ جایگاه اول آن می‌شود.در حالت سوم وزن معیارهایی مانند دقت ساخت، سیکل تکرار تولید و برخی عوامل فنی افزایش یافت تا تأثیر معیارهای عملکردی بیشتر بررسی شود. در این سناریو طرح Zindadi با امتیاز ۴۷۴ بار دیگر بالاترین امتیاز را به دست آورد. در همین حالت طرح FEZHM با امتیاز ۴۱۰ در رتبه دوم و طرح FEZHM Haitian با امتیاز ۳۱۰ در رتبه سوم قرار گرفت. این نتیجه نشان می‌دهد که زمانی که معیارهای فنی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند، فاصله عملکردی بین Zindadi و سایر گزینه‌ها همچنان قابل توجه باقی می‌ماند.در سناریوی چهارم که بیشترین تغییر در وزن برخی معیارها مانند کاهش ضایعات، سیکل تولید و دقت ساخت اعمال شد، امتیاز نهایی گزینه‌ها مجدداً محاسبه گردید. در این حالت نیز طرح Zindadi با امتیاز ۵۰۶ بالاترین امتیاز را کسب کرد و جایگاه نخست خود را حفظ نمود. در همین سناریو طرح Haitian با امتیاز ۴۲۲ در رتبه دوم قرار گرفت و طرح FEZHM با امتیاز ۲۹۷ همچنان در رتبه سوم باقی ماند. افزایش امتیاز Zindadi در این حالت نشان‌دهنده سازگاری بالای این طرح با معیارهای کلیدی تولید صنعتی است.بررسی نتایج چهار سناریوی وزن‌دهی نشان می‌دهد که با وجود تغییرات مختلف در اهمیت معیارها، رتبه‌بندی گزینه‌ها تغییری نکرده است. در تمامی حالات، طرح Zindadi در رتبه اول، طرح Haitian در رتبه دوم و طرح FEZHM در رتبه سوم قرار گرفته‌اند(به استثنا حالت سوم که مدل FEZHM در رتبه دوم قرار گرفته است). این موضوع بیانگر پایداری نتایج و برتری نسبی طرح Zindadi در مجموعه معیارهای مورد بررسی است. به عبارت دیگر، حتی زمانی که اولویت‌های تصمیم‌گیری تغییر کرده، این طرح بالاترین امتیاز را کسب می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طرح Zindadi از نظر ترکیب عوامل فنی، اقتصادی و عملیاتی مناسب‌ترین گزینه در میان طرح‌های مورد بررسی محسوب می‌شود و انتخاب آن از دیدگاه تحلیل چندمعیاره قابل توجیه است.

جدول ۲ – رتبه بندی گزینش فناوریهای ساخت قالب براساس نتایج روش چند معیاره ویکور

حالت تحلیل	رتبه ۱	رتبه ۲	رتبه ۳
حالت اول	Zindadi-**463**	Haitian-**384**	FEZHM-**276**
حالت دوم	Zindadi-**468**	Haitian-**394**	FEZHM-**291**
حالت سوم	Zindadi-**474**	FEZHM-**410**	Haitian-**310**
حالت چهارم	Zindadi-**506**	Haitian-**422**	FEZHM-**297**

مراجع

Building and Construction Authority (BCA). (2020). *Prefabricated Prefinished Volumetric Construction Guide*. Singapore.

Gibb, A. (1999). *Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation*. Wiley.

Lawson, R., Ogden, R., & Bergin, R. (2014). Application of modular construction in high-rise buildings. *Journal of Architectural Engineering*.

Pan, W., & Sidwell, R. (2011). Demystifying the cost barriers to offsite construction. *Construction Management and Economics*.

Jaillon, L., & Poon, C. (2009). The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong. *Automation in Construction*.

Goodier, C., & Gibb, A. (2007). Future opportunities for offsite in the UK. *Construction Management and Economics*.

Kamali, M., & Hewage, K. (2016). Life cycle performance of modular buildings. *Journal of Cleaner Production*.

Lawson, M., Ogden, R., & Goodier, C. (2012). Design in modular construction. *Steel Construction Institute*.

Lu, W., & Yuan, H. (2013). Investigating waste reduction potential in prefabrication. *Waste Management*.

Mao, C., Shen, Q., Pan, W., & Ye, K. (2015). Major barriers to off-site construction. *Journal of Construction Engineering and Management*.

Opricovic, S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems. Faculty of Civil Engineering, Belgrade.

Opricovic, S., & Tzeng, G.H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. European Journal of Operational Research, 156(2), 445–455.

Smith, R. E. (2016). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Wiley.

Tzeng, G.H., Teng, M.H., Chen, J.J., & Opricovic, S. (2002). Multi-criteria selection for a restaurant location in Taipei. *International Journal of Hospitality Management*, *21*(2), 171–187.

Zavadskas, E.K., & Turskis, Z. (2011). Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview. *Technological and Economic Development of Economy*, *17*(2), 397–42