

چارچوب یکپارچه مدل سازی اطلاعات ساختمان و هزینه چرخه عمر برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی بلندمرتبه

سجاد طاهری جبلی^۱، بهروز بهنام^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، sajadtaheri@aut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، b.behnam@aut.ac.ir

چکیده

به طور کلی استراتژی غالب در طراحی سازه‌ها کاهش وزن اولیه سازه می‌باشد، و البته هزینه‌های محتمل آینده نظیر خرابی‌های ناشی از زلزله عموماً نادیده گرفته می‌شوند. با توجه به تنوع ساختمان‌های شهری از منظر منظمی و نامنظمی، بررسی هزینه چرخه عمر آنها حائز اهمیت است؛ این مهم هنوز به طور کامل در تحقیقات گذشته مورد بررسی واقع نشده است. از سوی دیگر، فقدان یکارگیری مدلسازی اطلاعات ساختمان در پژوهش‌های پیشین برای استفاده در طراحی مبتنی بر هزینه چرخه عمر سازه‌ها مشهود است. این تحقیق با هدف برجسته کردن تأثیر نامنظمی بر هزینه چرخه عمر سازه‌ها، چارچوبی یکپارچه مبتنی بر بهینه‌سازی طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و با استفاده از ظرفیت‌های هزینه چرخه عمر و مدلسازی اطلاعات ساختمان ارائه می‌کند. بدین منظور یک محیط اشتراکی در نرم افزار متلب ایجاد، اطلاعات بین نرم‌افزارهای رویت، ایتبس و اکسل تبادل و بهینه‌سازی با استفاده از NSGA-II برای موازنه هزینه اولیه و هزینه چرخه عمر صورت می‌گیرد. ابزارهای مدلسازی اطلاعات ساختمان می‌توانند تا حدود زیادی محدودیت‌های تحلیل هزینه چرخه عمر مانند زمان تبادل اطلاعات را کاهش و دقت و سرعت محاسبات را افزایش دهد. با مدلسازی شش مدل در دو تیپ منظم و نامنظم، چارچوب پژوهش و تفاوت رفتار سازه‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج تحقیق نشان داد که هزینه‌های غیرمستقیم سازه‌های نامنظم نسبت به منظم بیشتر هستند. علاوه بر این، یافته‌ها نشان می‌دهند که کاهش هزینه‌های چرخه عمر سازه‌های نامنظم نسبت به منظم نیازمند افزایش درصد هزینه اولیه بالاتری هستند. بعنوان مثال، برای سازه ۱۳ طبقه منظم و نامنظم، افزایش ۱۷٪ هزینه اولیه به ترتیب منجر به کاهش ۴۸٪ و ۴۰٪ هزینه چرخه عمر آنها می‌شود.

کلمات کلیدی

سازه‌های نامنظم، مدلسازی اطلاعات ساختمان، هزینه چرخه عمر، طراحی مبتنی بر عملکرد، بهینه‌سازی چندهدفه.

۱- مقدمه

مهندسان همیشه بدنبال طراحی سیستم‌های بهینه‌ای بوده‌اند که بدلیل محدودیت منابع، در عین برآورده کردن غالب نیازها، ارزان‌ترین گزینه نیز باشند. در صنعت ساخت نیز اکثر مهندسان در طراحی سازه‌ها به دنبال کاهش هزینه‌های اولیه ساخت، اغلب باز طریق کاهش وزن ساختمان هستند؛ در حالی که ممکن است این طرح بهینه در طول چرخه عمر ساختمان الزاماً بهینه نباشد [۱]. زیرا تجارب قبلی نشان داده‌اند که خسارات جانی و مالی ناشی از بلایای طبیعی مانند زلزله ممکن است تا چند برابر هزینه اولیه ساخت باشند. لذا می‌توان در رویکردی متفاوت، به جای تنها کاهش هزینه‌های اولیه ساخت، هزینه‌های چرخه عمر^۱ (LCC) را بهینه کرد تا از مزایای آن برای افزایش ایمنی جانی افراد در کنار حفظ منابع مالی در طولانی مدت بهره برد [۲].

با این وجود، در نظر گرفتن هزینه‌های چرخه عمر نیازمند اطلاعات زیادی می‌باشد که می‌تواند فرآیندهای طراحی را طولانی‌تر و پیچیده‌تر کند. به طور کلی پیچیدگی‌های طراحی بر اساس LCC و همچنین زمان و هزینه مضاعف آن در فرآیند طراحی مانع از کاربرد آن به عنوان یک رویه رایج در فرآیند طراحی فعلی می‌باشد. یکی از راهکارهایی که می‌تواند این پیچیدگی‌ها را کاهش دهد، استفاده از سیستم‌های مدیریت یکپارچه می‌باشند. اخیراً، ادغام روش‌های محاسبه LCC با تکنیک‌های پیشرفته مدیریت اطلاعات ساخت مانند

^۱ Life cycle cost

مدلسازی اطلاعات ساختمان^۱ (BIM) مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۳]. بکارگیری همزمان BIM و LCC منجر به ایجاد مزایای مفیدی برای صنعت ساخت خواهد شد و شرایط انتخاب آگاهانه سازه بهینه در بلندمدت را تسهیل خواهد کرد؛ بخصوص در شرایطی که سهم ساخت و ساز در کشورهای مختلف مانند تاجیکستان، گرجستان، سوئد [۴] و ایران [۵] در سال ۲۰۲۲ به ترتیب ۱۲/۲، ۸، ۶/۶ و ۵/۶ درصد از تولید ناخالص داخلی آن‌ها بوده است.

از دیگر سو، با توجه به تنوع ساختمان‌های شهری از منظر منظمی یا نامنظمی معماری، می‌توان ادعا کرد که در عمل به ندرت می‌توان ساختمان‌های منظم در شهرها یافت؛ این ادعا ریشه در نکات مختلفی از جمله الزامات عملکردی و زیبایی شناختی در شهرسازی دارد. توجه خاص به ساختمان‌های نامنظم از این منظر مهم است که تجارب و آمار حاصل از زلزله‌های گذشته نشان داده‌اند که این نوع سازه‌ها به میزان قابل توجهی بیشتر از سازه‌های منظم آسیب می‌بینند [۶]. تحقیقات نیز نشان داده‌اند که شاخص‌های خرابی لرزه‌ای در سازه‌های نامنظم (بخصوص سازه‌های بلندمرتبه) عموماً بیشتر از منظم هستند [۷]. علیرغم این، تحقیقات کمی به مقایسه طراحی بر مبنای LCC سازه‌های نامنظم و منظم پرداخته‌اند.

با توجه به مباحث فوق، هدف اول این مقاله ایجاد چارچوبی برای بهینه‌سازی طراحی لرزه‌ای بر مبنای LCC با استفاده از ظرفیت‌های BIM و در قالب یک راه حل مدیریت یکپارچه اطلاعات است. هدف دوم نیز با توجه به گسترش ساختمان‌های نامنظم در شهرها، برجسته کردن تفاوت هزینه خسارت احتمالی که ممکن است توسط سازه‌های نامنظم در مقایسه با سازه‌های منظم از دیدگاه مبتنی بر عملکرد در اثر زلزله متحمل شود، می‌باشد. برای این مورد از طریق بکارگیری الگوریتم فرایتن‌کاری به بهینه‌سازی ۶ مدل سازه فولادی سه بعدی ۱۰، ۷ و ۱۳ طبقه در دو حالت منظم و نامنظم پس‌نشسته^۲ پرداخته می‌شود.

۲- ادبیات موضوع

۲-۱- هزینه چرخه عمر در طراحی سازه

LCC یک دارایی ارزیابی اقتصادی است که با در نظر گرفتن هزینه‌های اولیه، بهره‌برداری و دورریزی حاصل می‌شود [۸]. این ارزیابی با تعیین کلیه هزینه‌های طول عمر و با استفاده از روش‌های حسابداری مانند تکنیک ارزش فعلی، قابل محاسبه است [۹]. تحقیقات اولیه در حوزه بهینه‌سازی سازه‌ها بیشتر بر روی هزینه‌های اولیه متمرکز بودند [۱۰]، اما هنگامی که تحقیقاتی نشان دادند که هزینه‌های بهره‌برداری می‌تواند بیش از ۵۰٪ LCC باشد [۱۱]، تحقیقات به سمت راه‌حل‌های کاهش LCC و یافتن طراحی بهینه براساس مجموع هزینه اولیه و ثانویه (نظیر هزینه‌های مورد انتظار ناشی از زلزله) سوق پیدا کرد. در این راستا ون و کنگ^۳ [۱۲] مدلی برای محاسبه LCC در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی فولادی ارائه دادند. انگ و لی^۴ بر اساس شاخص خسارت پارک-انگ به تحلیل LCC ساختمان‌های بتن مسلح پرداختند [۱۳]. سارما و آدلی^۵ [۱۴] مدلی مبتنی بر منطق فازی برای بهینه‌سازی LCC سازه‌های فولادی ارائه کردند. لی و چنگ^۶ [۱۵] یک مدل مبتنی بر کاهش خرابی ناشی از زلزله برای بهینه‌سازی سازه‌ها ارائه کردند. کهنو و کولینز^۷ با استفاده از نرم افزار HAZUS بر روی بهینه‌سازی LCC سازه‌های بتن مسلح تحقیق کردند [۱۶]. شین و سینگ^۸ [۱۷] با الهام از روش ون و کنگ [۱۲]، روشی را برای محاسبه هزینه‌های ثانویه مرتبط با سطوح مختلف خرابی سازه‌ها ارائه کردند. تمام موارد فوق اشاره نشان دادند که سازه‌های بهینه پیشنهادی بر مبنای LCC عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به طراحی‌های مبتنی بر آیین‌نامه‌های رایج دارند.

^۱ Building information modeling

^۲ Setback

^۳ Wen and Kang

^۴ Ang and Lee

^۵ Sarma and Adeli

^۶ Li and Cheng

^۷ Kohno and Collins

^۸ Shin and Singh

۲-۲- یکپارچه‌سازی هزینه چرخه عمر و مدلسازی اطلاعات ساختمان

روش‌های کلاسیک طراحی و مدیریت ساخت قادر به ارائه خدمات یکپارچه در تمامی مراحل پروژه نمی‌باشند. در این راستا BIM با توسعه فناوری منجر به ایجاد یک بستر یکپارچه شد، که می‌تواند فراتر از زمان طراحی پروژه بوده و در سراسر چرخه عمر مورد استفاده قرار گیرد [۱۸]. BIM مزایای قابل توجهی، از جمله توانایی کار با ویژگی‌های عناصر مختلف از جمله اشکال هندسی و اطلاعات مربوط به عملکرد، تحویل و بهره‌برداری را داراست [۱۹]. ضمن آنکه با توجه به پیشرفت و افزایش بکارگیری BIM در صنعت ساخت، توان بارگذاری و بهره‌مندی از اطلاعات بیشتر و مفیدتری درون مدل ایجاد شده در دسترس است [۲۰].

BIM می‌تواند به عنوان قسمتی مهم در چرخه عمر پروژه مورد استفاده قرار گیرد و ارتباطات بین فازهای پروژه را تسهیل کند. مدل‌ها در این ابزار کلیه اطلاعات حیاتی را در خود ذخیره می‌کنند و با استفاده از آنها می‌توان تصویر بهتری از پروژه برای دینفعان در تصمیم‌سازی‌ها فراهم آورد. این ابزار همچنین از همزمانی و تداخلات برنامه‌ها جلوگیری می‌کند [۲۱].

ضرورت بکارگیری این فناوری را می‌توان در کاربردهای متعدد آن در چرخه عمر و همچنین کمیته‌سازی منابع پروژه، کاهش زمان و هزینه پروژه دانست. زیرا ساخت‌وساز فرآیندی است نیازمند وجود اطلاعات کافی مربوط به اجزای ساختمان، و هزینه و زمان نسبتاً بالایی نیز جهت دستیابی به این اطلاعات صرف می‌شود. از طرفی هر قدر اطلاعات به دست آمده از اجزای ساخت دقیق‌تر باشند، تصمیم‌ها نیز بهینه‌تر بوده و در نتیجه هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری پروژه کاهش خواهد یافت [۲۲].

در راستای بکارگیری همزمان BIM و LCC، راد و همکاران چارچوبی برای تحلیل LCC ساختمان‌های تاب‌آور بر اساس BIM ارائه کردند [۲۳]. مرسی و همکاران به ارزیابی اثرات زیست‌محیطی یک ساختمان مسکونی با توجه به نوع سازه و مصالح آن در طول چرخه عمر، بر بستر BIM پرداختند [۳]. هلبگ^۱ و همکاران با بکارگیری BIM برای تحلیل چرخه عمر به ارزیابی پتانسیل گرمایش جهانی در کل فرآیند طراحی یک ساختمان پرداختند [۲۴]. ژوانگ^۲ و همکاران یک چارچوب ارزیابی عملکرد یکپارچه مبتنی بر BIM برای بهینه‌سازی انرژی چرخه عمر ساختمان پیشنهاد دادند [۲۵]. راپوسو^۳ و همکاران با در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی به تحلیل چرخه عمر عناصر پیش‌ساخته بتنی ساختمان‌های صنعتی جدید و مقایسه راه‌حل‌های تقویت لرزه‌ای این عناصر در ساختمان موجود با بکارگیری BIM پرداختند [۲].

علیرغم تحقیقات انجام گرفته، فقدان قابلیت‌های یکپارچه مدل‌ها و کاربردهای BIM در مطالعات صورت‌گرفته در حوزه طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بر مبنای LCC مشهود است؛ زیرا رویکردهای قبلی دارای محدودیت‌هایی نظیر پایگاه‌های داده غیرقابل ویرایش و مسائل مرتبط با عدم یکپارچگی می‌باشند [۲۶]. حتی این استدلال نیز وجود دارد که استفاده از ابزار BIM می‌تواند تا حد زیادی محدودیت‌های تحلیل LCC مانند زمان صرف‌شده در جمع‌آوری داده‌های ورودی را کاهش دهد [۲۷]؛ و باعث سرعت بخشیدن فرآیند تحلیل LCC و در نتیجه کاربردی شدن آن شود. برای این منظور با ورود اطلاعات مورد نیاز عناصر در BIM، بخصوص اطلاعات مالی، می‌توان با صرف کمترین زمان و هزینه برآورد دقیقی از LCC، با توجه به اعدادی مانند نرخ تنزیل بدست آورد، بنحوی که با اعمال کوچکترین تغییری در مدل، اثرات آن در کل پروژه بصورت برخط قابل رؤیت باشد.

۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی لرزه‌ای

الگوریتم‌های بهینه‌سازی را می‌توان به دو دسته الگوریتم‌های دقیق و تقریبی تقسیم‌بندی کرد. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مورد مسایل پیچیده و مقید کارایی زیادی ندارند، زیرا با پیچیده شدن مسئله، زمان حل آن به صورت تصاعدی بالا می‌رود. در مقابل الگوریتم‌های تقریبی در زمانی کوتاه‌تری نسبت به الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب‌های بهتری (نزدیک به بهینه) برای مسایل پیچیده می‌باشند [۲۸]. الگوریتم‌های تقریبی به سه دسته ابتکاری، فراابتکاری و فوق ابتکاری بخش‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های فراابتکاری مانند ژنتیک هالند [۲۹]، کلونی زنبورها [۳۰] و کلونی مورچگان [۳۱] دارای راهکارهای برون رفت از نقاط بهینه محلی هستند و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند.

^۱ Hollberg

^۲ Zhuang

^۳ Raposo

الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) جزء موثرترین روش‌های بهینه‌سازی است که از فرآیند تکامل در طبیعت الهام گرفته شده و شامل سه عملیات اصلی انتخاب، ترکیب و جهش است. با توجه به سادگی و قابلیت‌های آن برای حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی با تعداد متغیر زیاد، به طور گسترده در موضوعات مختلف مهندسی عمران و بهینه‌سازی طراحی سازه‌ها استفاده شده است [۳۲].

لیو^۲ و همکاران [۳۳] یک روش بهینه‌سازی چندمنظوره طراحی لرزه‌ای مبتنی بر GA برای قاب‌های فلزی با در نظر گرفتن وزن، حداکثر جابجایی نسبی بین طبقه و معیارهای پیچیدگی طراحی پیشنهاد کردند. کاوه و همکاران [۳۴] با روشی تقریبی هزینه‌های حالات خرابی مختلف را به صورت درصدی از هزینه اولیه در نظر گرفته و با استفاده از GA به بهینه‌سازی طراحی لرزه‌ای دو سازه پرداختند. بسیم و همکاران [۳۵] با GA بهینه‌سازی طراحی لرزه‌ای یک سازه ۵ طبقه دوبعدی را بر مبنای LCC و با استفاده از روش زمان استقامت انجام دادند. پارک^۳ و همکاران [۳۶] با استفاده از GA روشی برای بهینه‌سازی تعداد اتصالاتی که برای بهسازی سازه بر مبنای LCC مورد نیاز است ارائه دادند. شین و سینگ [۳۷]، با استفاده از GA به بهینه‌سازی طراحی نوعی میراگر پرداختند، بنحوی که LCC با توجه به آسیب‌های احتمالی ناشی از زلزله به حداقل ممکن برسد.

بررسی ادبیات موضوعی نشان می‌دهد اگرچه در حال حاضر اهمیت توجه به استفاده از LCC بر کسی پوشیده نیست، اما بدلیل چالش‌های متعدد در بکارگیری آن در بهینه‌سازی طراحی ساختمان، عملاً استفاده از آن در جامعه مهندسی فراگیر نشده است. این در حالی است که می‌توان با استفاده از کاربردهای BIM بسیاری از این چالش‌ها را مرتفع کرد. از طرفی با توجه افزایش استفاده از هوش مصنوعی و بهینه‌سازی‌های فراابتکاری می‌توان از طریق بکارگیری GA در فضای یکپارچه BIM به ساده‌سازی و کاربردی‌تر کردن تحلیل‌های مبتنی بر طراحی لرزه‌ای بر اساس LCC اقدام نمود. این یک مزیت بزرگ با توجه به تعداد محدود مطالعات در خصوص ادغام این سه حوزه است، که به عنوان بخشی از نوآوری این مقاله نیز می‌باشد.

۳- روش تحقیق

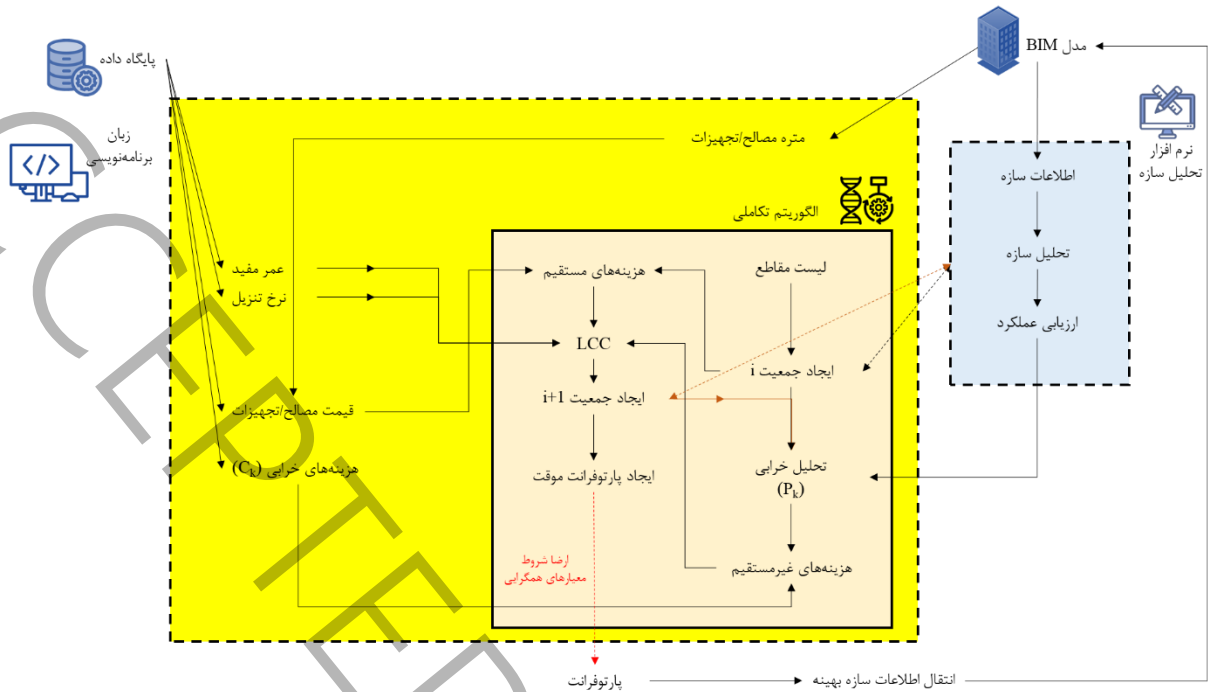
ایده اصلی روش انجام این تحقیق و ادغام LCC و BIM را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد. پس از طراحی اولیه ساختمان، با استفاده از استخراج داده‌های موردنیاز برآورد LCC از طریق دیتابیس و مدل BIM و ادغام آن‌ها از طریق یک زبان برنامه‌نویسی به عنوان فضای اشتراکی، شرایط مهیای بهینه‌سازی خواهد شد. در ادامه با استفاده از یک روش بهینه‌سازی که درون فضای اشتراکی ایجاد شده است، بهینه‌سازی سازه بر مبنای LCC صورت خواهد گرفت. بدین صورت که در یک چرخه مشخص، المان‌های سازه از طریق الگوریتم فراابتکاری تغییر می‌کند، در نرم افزار تحلیل سازه ارزیابی می‌شود و سطح عملکرد آن بدست می‌آید. با توجه به سطح عملکرد، خرابی موردانتظار و هزینه‌های غیرمستقیم متناظر آن و در نتیجه LCC بدست می‌آید. در پایان چرخه بهینه‌سازی با ایجاد نمودار پارتو فرانت^۴، گزینه‌های مختلف در اختیار طراح قرار می‌گیرد که با توجه به اصل منافع-هزینه توان انتخاب سناریوی موردنظر خود را خواهد شد. در نهایت سازه بهینه به عنوان خروجی کار در مدل BIM جایگزین سازه اولیه قرار داده می‌شود.

^۱ Genetic algorithm

^۲ Liu

^۳ Park

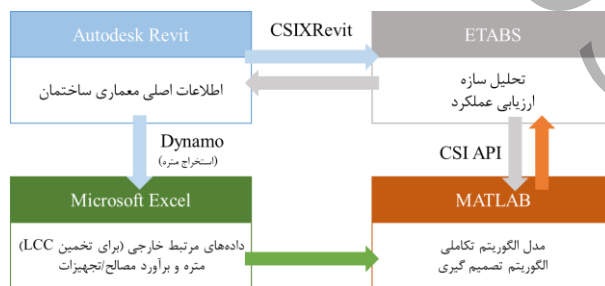
^۴ Pareto front



شکل ۱- کانسپت روش تحقیق و ادغام LCC و BIM

Fig.1. concept of research method and integration of LCC and BIM

علیرغم اینکه رویه‌های ارزیابی اقتصادی بسیار زیاد هستند، اما طراحان و ذینفعان صنعت ساخت به دلیل پیچیدگی کاربرد آن‌ها به ندرت از آن‌ها استفاده می‌کنند [۳۸]. لذا برای کاربردی کردن آن نیاز به استفاده از نرم‌افزارهایی است که در عین سهولت استفاده، سرعت پردازش زیاد، دقت در برآورد، بومی‌سازی مصالح، تبادل اطلاعات، ارائه گزینه‌های مختلف، کاهش دخالت نیروی انسانی و خودکارسازی روندها را نیز داشته باشد. از طرفی محتوای BIM تا حد زیادی به نرم‌افزارهای مورد استفاده مرتبط هستند. بنابراین انتخاب مناسب نرم‌افزارهایی که از طریق فرمت‌های تبادل داده استاندارد^۱ و یا موتورهای برنامه‌نویسی مانند متلب و پایتون با یکدیگر مرتبط شوند، مهم خواهد بود [۲۳]. نرم‌افزارهای مختلفی مبتنی بر BIM ارائه شده‌اند که هر کدام یک یا چند قابلیت مرتبط با طراحی، ساخت و بهره‌برداری را ارائه می‌کنند [۲۳]. اما برای دستیابی به اهداف تعیین شده، نرم‌افزارهایی انتخاب شدند که بتوانند از طریق برنامه‌نویسی یا نرم‌افزارهای واسط با یکدیگر تبادل اطلاعات داشته باشند. برای این منظور نرم‌افزارهای رویت به عنوان هسته اصلی مدل BIM، ایتبس به عنوان تحلیل‌گر سازه، اکسل به عنوان پایگاه داده و متلب به عنوان زبان برنامه‌نویسی و هسته مرکزی الگوریتم بهینه‌سازی با نحوه تعاملی بصورت شکل ۲ جهت مدل این پژوهش در نظر گرفته شدند.

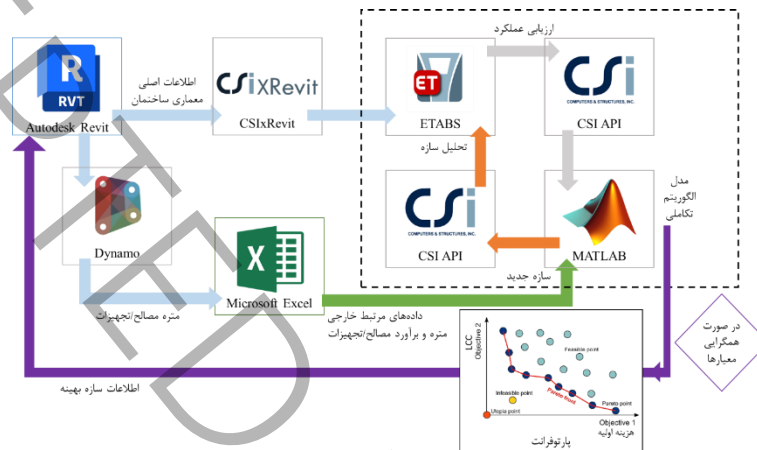


شکل ۲- معماری کلی نرم‌افزارها

Fig.2. The overall software architecture

^۱ Standard interaction file formats

نرم افزار رویت و ایتبس از طریق افزونه CSIXRevit قابلیت تبادل اطلاعات مدل سازه به صورت رفت و برگشتی با یکدیگر را دارند. برای برآورد هزینه اولیه ساخت از طریق داینامو^۱ به صورت اتوماتیک لیست تمامی احجام به دیتابیس اکسل منتقل می‌شوند و به همراه دیگر اطلاعات مورد نیاز برای تخمین LCC ساختمان (رجوع شود به ۳,۳) در زمان اجرای الگوریتم بهینه‌سازی، توسط متلب از اکسل فراخوانی خواهد شد. از سوی دیگر الگوریتم بهینه‌سازی در متلب از طریق کدهای API^۲ ایتبس به صورت مدام المان‌های سازه را در این نرم افزار تغییر می‌دهد، سازه را تحلیل و الزامات آیین نامه نظیر حداکثر دررفت مجاز، ستون قوی-تیر ضعیف و غیره را کنترل می‌کند تا در نهایت با همگرایی الگوریتم، سازه بهینه انتخاب و در مدل BIM به‌روزرسانی شود. در شکل ۳ گردش کار روش بهینه‌سازی مطرح شده که از ادغام شکل‌های ۱ و ۲ بدست‌آمده قابل مشاهده است.



شکل ۳- گردش کار روش بهینه‌سازی

Fig.3. Optimization methodology workflow

۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه

باتوجه به اینکه LCC متشکل از هزینه‌های اولیه ساخت‌وساز و هزینه‌های ثانویه ناشی از خرابی است، فرآیندی مطلوب‌تر است که هزینه‌های ثانویه را در یک موازنه با هزینه‌های مستقیم اولیه در بهینه‌سازی طراحی سازه در نظر بگیرد. لذا برای این منظور بهینه‌سازی چندهدفه و الگوریتم‌های فراابتکاری توصیه شده است [۳۹]. یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه شامل n متغیر طراحی، m تابع هدف و i تابع محدودیت است. رابطه بهینه‌سازی این تحقیق به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$\min_{s \in F} [C_{IC}(s), C_{LCC}(s)]^T \quad (1)$$

$$\text{Subject to } C_j(s) \leq 0, j = 1, \dots, i$$

که در آن C_{IC} تابع هدف هزینه سازه اولیه و C_{LCC} تابع هدف LCC است. s نشان دهنده بردار طراحی است که با مقاطع تیپ تیرها و ستون‌های سازه مطابقت دارد. F مجموعه سازه‌های امکان پذیر در فضای طراحی گسسته R^n است که توابع محدودیت $C_j(s)$ را برآورده می‌کند (رابطه ۲).

$$F = \{s \in R^n \mid C_j(s) \leq 0, j = 1, \dots, i\} \quad (2)$$

در یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه، هیچ جواب منحصر به فردی وجود ندارد که نشان دهنده بهینه‌ترین حالت C_{IC} یا C_{LCC} باشد. بنابراین، در نهایت مجموعه‌ای از سازه‌های بهینه که با جبهه پارتو مطابقت دارد، معرفی خواهند شد. بردار $s^* \in F$ یک پارتو برای رابطه (۱) است اگر و تنها در صورتی که بردار $s \in F$ دیگری نباشد که رابطه ۳ در مورد آن صدق کند.

^۱ Dynamo

^۲ application programming interface

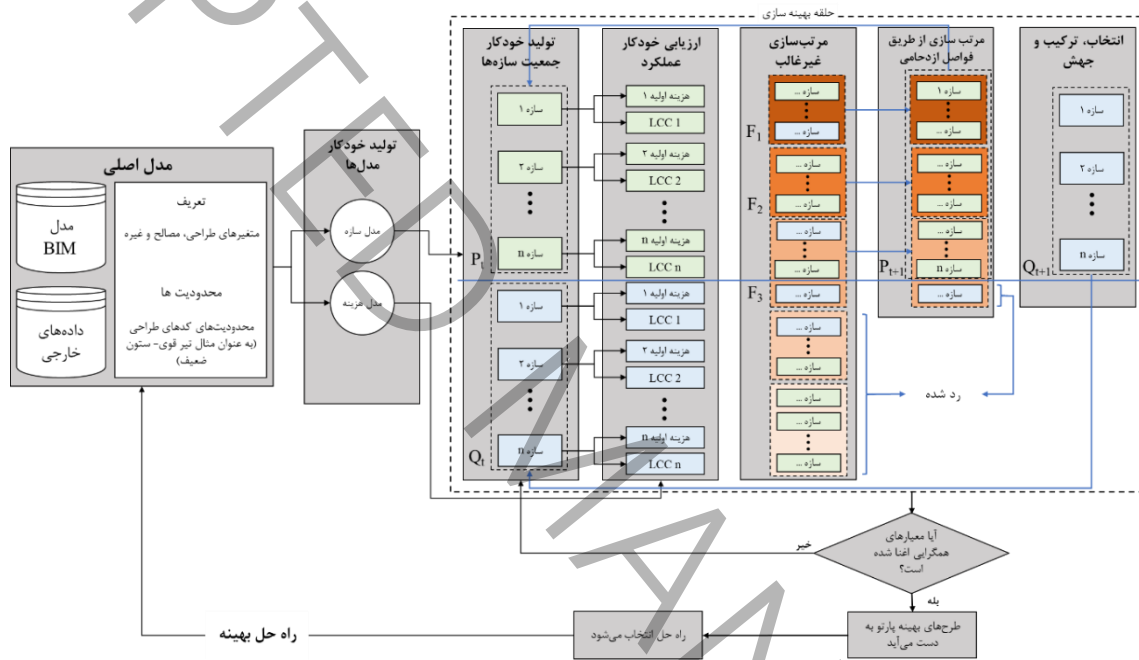
$$C_{IC}(s) \leq C_{IC}(s^*) \text{ with } C_{LCC}(s) < C_{LCC}(s^*)$$

or

$$C_{LCC}(s) \leq C_{LCC}(s^*) \text{ with } C_{IC}(s) < C_{IC}(s^*)$$

(3)

با توجه به تعداد زیاد متغیرها (المان‌های سازه‌ای) و وجود قیود آیین‌نامه‌ای، عملاً با یک مسئله پیچیده مواجه بوده که نیازمند استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشد. از طرفی به دلیل کارایی و گستردگی NSGA-II^۱ [۴۰] در حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی عمران و توانایی بالای آن در پوشش جبهه پارتو، در اینجا از این روش استفاده خواهد شد. روند کار NSGA-II مدل پیشنهادی به صورت شکل ۴ می‌باشد. پس از آنکه مدل سازه و هزینه اولیه از مدل BIM استخراج شد؛ الگوریتم وارد چرخه بهینه‌سازی می‌شود. برای مقایسه ارزش سازه‌های مختلف در این الگوریتم، هر چه رتبه غیرغالب یک سازه کمتر باشد، بهتر است. اگر دو سازه دارای رتبه غیرغالب یکسانی باشند، NSGA-II سازه با فاصله ازدحامی بیشتر را ترجیح می‌دهد. به طور خلاصه مراحل بکارگیری NSGA-II در الگوریتم بهینه‌سازی این پژوهش مطابق شکل ۵ است.



شکل ۴- روش NSGA-II در چارچوب پیشنهادی مقاله

Fig.4. NSGA-II procedure in the proposed framework of paper

^۱ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II

گام ۱	<ul style="list-style-type: none"> • جمعیت اولیه: تولید بردارهای والد P_t نسل اول ($s_i, i=1,2,\dots, P_t$) ۱. مرحله طراحی و کنترل: انجام تحلیل سازه و بررسی محدودیت های کد. ۲. محاسبه شاخص‌های سازگاری-ارزیابی توابع هدف $C_{LCC}(s_i)$ و $C_{IC}(s_i)$ برای بردارهای والد P_t
گام ۲	<ul style="list-style-type: none"> • مرتب‌سازی غیرغالب: ایجاد یک منحنی پارتو فرانت موقت
گام ۳	<ul style="list-style-type: none"> • تولید فرزندان: تولید بردارهای فرزندان Q_t با اعمال فرآیندهای ترکیب و جهش در بردارهای والد ۱. مرحله طراحی و کنترل: انجام تحلیل سازه و بررسی محدودیت های کد. ۲. محاسبه شاخص‌های سازگاری-ارزیابی توابع هدف $C_{LCC}(s_i)$ و $C_{IC}(s_i)$ برای بردارهای والد Q_t
گام ۴	<ul style="list-style-type: none"> • مرتب‌سازی غیرغالب: مرتب‌سازی بردارهای P_t+Q_t بر اساس شرایط غالب
گام ۵	<ul style="list-style-type: none"> • مرحله انتخاب: محاسبه فاصله ازدحام و بدست آمدن والدین جدید P_{t+1} از بردارهای P_t+Q_t
گام ۶	<ul style="list-style-type: none"> • مرتب‌سازی: ایجاد یک منحنی پارتو فرانت موقت
گام ۷	<ul style="list-style-type: none"> • بررسی همگرایی: اگر شرط توقف برآورده شود، الگوریتم متوقف می شود. در غیر این صورت به گام ۳ برمی‌گردد.

شکل ۵- مراحل روش NSGA-II

Fig.5. NSGA-II procedure steps

۳-۲- رویه طراحی مبتنی بر عملکرد

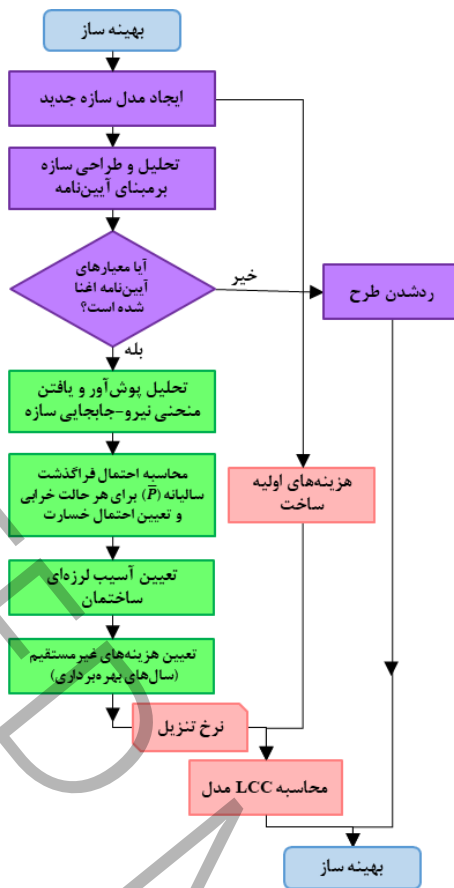
عملکرد یک سازه با نسبت دادن یک سطح عملکرد به آن بر اساس گروه‌بندی لرزه‌ای که بر اساس نوع کاربری ساختمان، پیامدهای نسبی خسارت زلزله کنترل می‌شود. در اینجا برای سطوح عملکرد IO، LS و CP سه زلزله به ترتیب با ۵۰، ۱۰ و ۲ درصد احتمال فراگذشت در ۵۰ سال انتخاب می‌شود [۴۱]. احتمال فراگذشت سالانه (P) برای یک زلزله با احتمال فراگذشت (p) در t سال با استفاده از رابطه ۴ تعیین می‌شود.

$$P = \frac{-1}{t} \ln(1-p) \quad (4)$$

از آنجا که با افزایش دررفت، سطح خرابی نیز افزایش می‌یابد، در کدهای مبتنی بر عملکرد احتمال خرابی بر اساس دررفت‌های بین طبقه‌ای ایجاد شده در سازه تعیین می‌شود. در سطح عملکرد O و IO سازه ممکن است تا ۱٪ دررفت گذرا را تجربه کند، اما تجربه دررفت دائمی مجاز نیست. در حالیکه در سطح عملکرد LS و CP سازه می‌تواند به ترتیب ۲ و ۴ درصد دررفت را تجربه کند. برای تعیین عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس احتمال از رابطه ۵ استفاده خواهد شد، بنحوی که در آن مفهوم عملکرد لرزه‌ای با مدل‌های احتمالی شدت زلزله، تقاضا و خرابی مرتبط است [۴۲].

$$\lambda(DV > dv) = \iiint G(dv|dm)dG(dm|edp)dG(edp|im)|d\lambda(im) \quad (5)$$

که dm سطح خرابی، edp یک تقاضای عددی مانند دررفت بین طبقه، im شتاب طیف و dv یک متغیر تصمیم‌گیری مانند هزینه است. پس از تعریف سطح عملکرد سازه، بهینه‌ساز شروع به ایجاد مدل‌ها، تحلیل آنها، ارزیابی خرابی و در نهایت محاسبه LCC آنها مطابق شکل ۶ خواهد کرد.



شکل ۶- جریان فرآیند طراحی مبتنی بر عملکرد

Fig.6. Performance-based design Procedure flowchart

در هر مرحله‌ای از فرآیند بهینه‌سازی، ابتدا (قسمت بنفش شکل ۶) بررسی می‌شود که آیا سازه کاندید محدودیت‌های مورد نظر (الزامات آیین‌نامه) را ارضا می‌کند و به مجموعه امکان پذیر رابطه ۲ تعلق دارد. در غیر این صورت از روش جریمه‌های ساکن^۱ آن سازه مردود می‌شود. در این روش پارامترهای جریمه به تعداد نسل فعلی بستگی ندارد و جریمه ثابتی اعمال می‌شود [۴۳]. در صورتی که سازه در برابر بارهای ثقلی به عنوان قیود مسئله مورد تایید قرار گرفت، فرآیند وارد قسمت سبز رنگ شکل ۶ می‌شود. از آنجاکه هنگام وقوع زلزله‌های شدید اغلب المان‌های سازه‌ای وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند، برای دستیابی پاسخ‌های عملکردی دقیق تر سازه، بخصوص برای سازه‌های نامنظم انجام تحلیل‌های غیرخطی نیاز است. در این مرحله بدلیل حجم اندک تحلیل، سادگی مدلسازی و نیاز زمانی کمتر نسبت به تحلیل دینامیکی غیرخطی، تحلیل پوش‌آور^۲ انجام و تخمین سطح خرابی سازه با توجه به حداکثر رانش بین طبقه‌های Δ صورت می‌گیرد و در نتیجه آن هزینه‌های ثانویه احتمالی برای سازه بدست می‌آید. طبق ASCE-7 [۴۴]، ترکیب بار ثقلی برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی مطابق رابطه ۶ است.

$$Q_D = 1.2Q_D + 1.6Q_L \quad (۶)$$

ترکیبات بار گرانشی نیز طبق ASCE41-17 [۴۴]، بحرانی‌ترین حالت روابط ۷ و ۸ در نظر گرفته می‌شود.

$$Q_D = 1.1(Q_D + Q_L) \quad (۷)$$

^۱ Static penalties

^۲ Pushover

$$Q_D = 0.9Q_D \quad (8)$$

در این تحلیل مدل سازه با استفاده از یک الگوی بار جانبی ثابت تحت جابجایی قرار می‌گیرد. هنگام رسیدن به جابجایی هدف یا زودتر، در صورت عدم همگرایی الگوریتم، تحلیل خاتمه می‌یابد. در اینجا الزامات تحلیل پوش‌آور مانند ترکیب بار گرانش و جابجایی هدف همگی بر اساس ASCE41-17، مطابق فرمول (۹) صورت گرفته است [۴۴].

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (9)$$

که C_0 ، C_1 و C_2 عوامل اصلاح هستند. C_0 جابجایی طیفی را به جابجایی احتمالی بام ساختمان مربوط می‌کند. C_1 حداکثر جابجایی غیر ارتجاعی مورد انتظار را به جابجایی محاسبه شده برای پاسخ الاستیک خطی مربوط می‌کند. C_2 نشان دهنده تأثیر شکل هیستریزس بر حداکثر پاسخ جابجایی است. T_e دوره اساسی موثر سازه در جهت مورد بررسی است. S_a شتاب طیف پاسخ مربوط به دوره T_e است که با g نرمال می‌شود.

با اتمام آنالیز پوش‌آور، منحنی نیرو-جابجایی سازه بدست خواهد آمد. با توجه به این نمودار، بیشینه دریافت بین طبقه‌ای متناظر با زلزله‌های با ۲٪، ۱۰٪ و ۵۰٪ احتمال فراگذشت را بدست می‌آورد و از آن طریق نمودار دریافت و احتمال فراگذشت سالیانه (\bar{P}) بدست می‌آید. از طریق نمودار دریافت و احتمال فراگذشت سالیانه و فرمول‌های قسمت ۳،۳ احتمال خرابی و به تبع آن هزینه خرابی به عنوان هزینه‌های غیر مستقیم LCC محاسبه شده و در نهایت (قسمت صورتی شکل ۶) با استفاده از نرخ تنزیل، عمر مفید و هزینه اولیه ساختمان LCC آن بدست خواهد آمد (توضیحات تکمیلی در بخش ۳،۳).

۳-۳- توابع هدف هزینه‌های اولیه و چرخه عمر

هزینه‌ی اولیه ساخت سازه (C_e) بعنوان تابع هزینه اولیه در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که سازه‌های متداول شهری عموماً هزینه‌های نگهداری و دفع خاصی ندارند و مقدار آن‌ها نسبت به هزینه‌های دیگر کوچکتر هستند، از هزینه‌های نگهداری و دفع صرف نظر می‌شود. و فقط هزینه اولیه ساخت سازه، متناسب با وزن کل اجزای آن به عنوان تابع هدف هزینه اولیه در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای دیگر، مانند هزینه پوشش محافظ در برابر آتش یا خوردگی در این مطالعه در نظر گرفته نمی‌شود.

تابع هدف LCC شامل مجموع هزینه‌های اولیه ساخت و غیرمستقیم (C_{ID}) می‌باشد. برای محاسبه C_{ID} ، هزینه‌های احتمالی ناشی از زلزله‌ای که ممکن است در طول عمر سازه رخ دهد در نظر گرفته می‌شود. مطابق رابطه ۱۰، C_{ID} شامل هزینه مرگ و میر (C_f)، هزینه تلفات (C_{inj})، ضرر اقتصادی (C_e)، هزینه جابجایی (C_r)، از دست دادن اموال (C_p) و هزینه تعمیرات (C_{re}) می‌باشد. برای محاسبه LCC از تابع پیشنهادی ون و کنگ [۴۵] به شرح رابطه ۱۱ استفاده می‌شود.

$$C_{ID} = C_{re} + C_p + C_r + C_e + C_{inj} + C_f \quad (10)$$

$$E[C(t,X)] = C_0 + (C_1 P_1 + C_2 P_2 + \dots + C_k P_k) \frac{V}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (11)$$

که t عمر مفید سازه است که برای کاربری مسکونی مطالعه حاضر ۵۰ سال می‌باشد. فرض می‌شود که پس از زلزله، سازه بازسازی شده و به حالت اولیه باز می‌گردد [۴۵]. V نرخ وقوع سالانه زلزله‌های مهم است که از طریق فرایند پواسون مدل می‌شود. بدیهی است که C_k مربوط به آینده و هزینه‌های ساخت مربوط به حال است. بنابراین تمام ارزش آتی C_k از طریق عبارت نمایی فرمول فوق به ارزش زمان ساخت تبدیل می‌گردد. بدین منظور نرخ تنزیل سالانه (λ) ۵٪ برای ایران در نظر گرفته می‌شود [۴۶]. P_k که از روابط ۱۲ و ۱۳ بدست می‌آید، برابر k امین احتمال حالت حدی با توجه به وقوع زلزله و C_k هزینه مربوطه است.

$$P_k = P_k(\Delta > \Delta_k) - P_{k+1}(\Delta > \Delta_{k+1}) \quad (12)$$

$$P_k(\Delta > \Delta_k) = \left(\frac{-1}{t}\right) \ln [1 - \bar{P}_k(\Delta > \Delta_k)] \quad (13)$$

که در آن $\bar{P}_k(\Delta > \Delta_k)$ احتمال فراگذشت سالانه حداکثر دریفت بین طبقه‌ای (متناظر با یک حالت جدول ۱) است و از رابطه‌ی ۱۴ بدست می‌آید. پارامترهای α و β این رابطه از طریق نمودار متناسب شده با زوج مقادیر $\bar{P}_k - \Delta_k$ بدست می‌آید. این زوج‌ها پاسخ زلزله‌های ۰، ۲، ۵ و ۱۰ درصد در ۵۰ سال که احتمال فراگذشت آن‌ها مشخص است (فرمول ۴)، می‌باشند. برای مثال، زلزله ۲/۵۰ احتمال فراگذشت سالانه ای برابر با

$$\bar{P}_{2\%} = \left(\frac{-1}{50}\right) \ln(1 - 0.02) = 4.04 * 10^{-2}$$

دارد.

$$\bar{P}_k(\Delta > \Delta_k) = \alpha e^{-\beta \Delta_k} \quad (14)$$

جدول ۱- حالت‌های خرابی و ویژگی‌های آن‌ها [۴۷]

Table 1. Damage states, and their features [47]

سطح عملکرد	حالت خرابی	دریفت بین طبقه‌ای	روزهای از کارافتادگی (درصدی از زمان ساخت اولیه)	هزینه تعمیرات (درصدی از هزینه اولیه)
۱	هیچ	$\Delta < 0.2$	۰	۰
۲	خفیف	$0.2 < \Delta < 0.5$	۰/۹	۰/۵
۳	سبک	$0.5 < \Delta < 0.7$	۳/۳۳	۵
۴	در حد متوسط	$0.7 < \Delta < 1.5$	۱۲/۴	۲۰
۵	سنگین	$1.5 < \Delta < 2.5$	۳۴/۸	۴۵
۶	عمده	$1.5 < \Delta < 5$	۶۵/۴	۸۰
۷	تخریب‌شده	$5 < \Delta$	۱۰۰	۱۰۰

ATC13 [۴۷] هزینه‌ی بازسازی ساختمان تخریب‌شده را درصدی از هزینه‌ی اولیه ساخت بیان می‌کند (ستون ۵ جدول ۱). البته در صورت آسیب بیش از ۵۰٪، از منظر هزینه-فایده، تخریب و نوسازی ساختمان از بازسازی منطقی‌تر است؛ لذا در این پژوهش هزینه تعمیرات سطح خرابی عمده نیز مانند تخریب‌شده، ۱۰۰٪ فرض می‌شود. در اینجا فرض گردید که هزینه تعمیرات و موارد دیگر فقط برای سازه مورد مطالعه است و آسیب وارده به زیرساخت‌های شهر تأثیری بر آن ندارد. ATC-13 [۴۷] میانگین زمان تعمیر سازه‌های آسیب‌دیده در زلزله را بر حسب زمان اولیه ساخت تخمین می‌زند (ستون ۴ جدول ۱). اگرچه این زمان ممکن است کم‌تر از مقدار واقعی تخمین زده شود و باعث کاهش هزینه‌های ثانویه LCC نسبت به مقدار واقعی آن شود، اما بدلیل اینکه شرایط برای همه مدل‌ها یکسان فرض می‌شود، در اصل مسئله بهینه‌سازی اخلاقی ایجاد نخواهد کرد.

برای محاسبه زمان اولیه ساخت ساختمان‌های متعارف پژوهش‌های زیادی صورت گرفته‌اند [۴۸-۵۰]. با این حال در این پژوهش با استفاده از روش دلفی، نظرات ۲۰ شرکت فعال و با سابقه بیش از ۲۰ سال در صنعت ساخت ایران، در مورد زمان ساخت ساختمان‌های با تعداد طبقات مختلف دریافت و پس از سه مرتبه رفت و برگشت نظرات، نتایج همگرا شدند. براین اساس مدت زمان ۱۷، ۲۳ و ۳۰ ماه به ترتیب برای ساخت ساختمان‌های ۷، ۱۰ و ۱۳ طبقه در نظر گرفته می‌شود.

از طرفی هنگامی که آسیب‌های وارده قابل توجه باشند، ساکنان در زمان تعمیر، مجبور به تخلیه ساختمان و احتمالاً اجاره یک محل جدید می‌شوند که تحت عنوان هزینه سکونت موقت جایگزین در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه هزینه سکونت موقت جایگزین مطابق بررسی سامانه‌های املاک ایران و تحقیقات میدانی، عدد ۲۱۶۰۰۰۰ ریال بر مترمربع در ماه به عنوان هزینه اجاره در شهر تهران در نظر گرفته شد. فرض می‌شود مساحت واحد اجاره‌ای مترژی برابر ساختمان اولیه دارد.

وسایل موجود در ساختمان‌های مسکونی ارزشی دارد که در صورت تخریب نیاز به جایگزینی دارند. از آنجا که ارزش این محتویات به مترژی ساختمان، محله و تعداد افراد ساکن در ساختمان مرتبط است، پرسش نامه‌ای تهیه شد و در اختیار ۲۰۰ نفر از شهروندان مناطق مختلف شهر تهران قرار گرفت؛ تا تخمین کلی از مبلغ وسایل خانه و مترژی خانه خود بیان کنند. با توجه به نتایج، قیمت محتویات ساختمان بر حسب متر مربع به طور میانگین ۵۱۰۰۰۰۰۰ ریال تخمین زده شد.

افراد زخمی شده در اثر زلزله ممکن است در حالت مختصر ۳ تا ۵ روز اول بعد از زلزله و در حالت شدید تا چندین هفته بعد از زلزله نیازمند مراقبت های پزشکی باشند. با استفاده از اطلاعات منتشر شده توسط موسسه عالی پژوهش تامین اجتماعی هزینه درمان جراحات سبک و سرپایی در ایران به طور میانگین برابر ۱۹۸۷۲۰۰۰۰ ریال و هزینه جراحات شدید به همراه بستری به طور میانگین برابر ۲۰۹۴۰۰۰۰۰۰ ریال می باشد [۵۱].

از سوی دیگر مرگ انسان ها نیز ضررهای اجتماعی و اقتصادی را ایجاد خواهد کرد. در واقع نیروهای انسانی منابعی هستند که در فعالیت های اقتصادی به کار گرفته می شوند و بازگشت سرمایه برنامه های آموزشی که توسط جامعه پرداخت شده را فراهم می کند. انتظار می رود که این هزینه ها در حدود ۳۰ تا ۳۵ سال زندگی کاری، بازپرداخت شود. بنابراین، اگر فردی زودتر از این بازه از چرخه خارج شود یک ضرر با پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم اجتماعی-اقتصادی را موجب می شود. تعیین این ضرر بستگی به چندین شاخص اجتماعی-اقتصادی دارد. محققان روش هایی را برای محاسبه هزینه های آن ارائه کرده اند [۵۲-۵۴]. میلر روشی بر مبنای تولید ناخالص داخلی^۱ (GDP) برای تخمین ارزش زندگی فرد در یک جامعه به صورت میانگین ۱۲۰ تا ۱۴۰ برابر GDP/Capita آن کشور بیان نمود [۵۵]. با توجه به اعلام ۱۰۲۰۰۰۰۰۰۰ ریال برای GDP/Capita ایران توسط صندوق بین المللی پول، حداقل ارزش جان افراد برابر ۱۲۲۴۰۰۰۰۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته خواهد شد.

برای تعیین میزان هزینه های تلفات و جراحات انسانی، تعداد افراد ساکن در واحدهای مسکونی و نرخ بروز تلفات مورد نیاز است. در شهر تهران سرانه فضای مسکونی ۲۱,۹ متر مربع است [۵۶]. با فرض ۲۵ متر مربع در جهت ساده سازی اعداد، به ازای هر متر مربع ۰,۰۴ نفر در شرایط خطر ناشی از زلزله قرار دارند. نرخ بروز جراحات و تلفات مطابق جدول ۲ می باشد.

جدول ۲- نرخ بروز جراحات انسانی [۵۷] و تلفات [۴۷] در هر سطح خرابی

Table 2. Incidence rate of human injury [57] and fatality [47] to the damage states

سطح عملکرد	حالت خرابی	نرخ بروز جراحات مختصر مورد انتظار	نرخ بروز جراحات شدید مورد انتظار	نرخ بروز تلفات مورد انتظار
۱	هیچ (بدون آسیب)	۰	۰	۰
۲	خفیف	3.0E-05	4.0E-06	1.0E-06
۳	سبک (کم)	3.0E-04	4.0E-05	1.0E-05
۴	متوسط	3.0E-03	4.0E-04	1.0E-04
۵	سنگین	3.0E-02	4.0E-03	1.0E-03
۶	عمده (زیاد)	3.0E-01	4.0E-02	1.0E-02
۷	تخریب شده	4.0E-01	4.0E-01	2.0E-01

به عنوان جمع بندی می توان موارد بدست آمده در محاسبه هزینه های ثانویه چرخه عمر را مطابق جدول ۳ به طور خلاصه بیان نمود.

جدول ۳- عوامل محاسبه هزینه های ثانویه چرخه عمر

Table 3. Factors of calculating the secondary costs of the life cycle

متغیر	هزینه	معادله	هزینه پایه
C_{damj}	خسارت تعمیر	هزینه اولیه ساخت * مساحت ساختمان * شاخص خسارت متوسط	
C_{conj}	ضرر (از بین رفتن) محتویات	ضرر محتویات واحد * مساحت ساختمان * شاخص خسارت متوسط	محتویات ۵۱,۰۰۰,۰۰۰ ریال بر متر مربع
C_{rel}	اسکان موقت	هزینه اسکان موقت * مساحت قابل اجاره * هدررفت زمان	۷۲,۰۰۰ ریال بر روز بر متر مربع
C_{eco}	ضرر اقتصادی	معادل اجاره بها	-
C_{renj}	اجاره بها	نرخ اجاره بها * مساحت قابل اجاره * زمان از دست دادن عملکرد	۷۲,۰۰۰ ریال بر روز بر متر مربع
C_{inj}	جراحات	هزینه جراحات هر نفر * نرخ جراحات مورد انتظار	۱۹۸,۷۲۰,۰۰۰ ریال بر نفر (وضعیت جزئی)

^۱ Gross Domestic Product

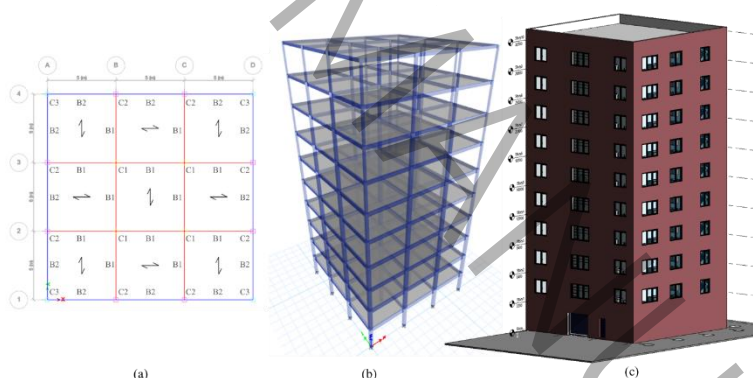
	هزینه فوت هر نفر * نرخ فوت موردانتظار	تلفات انسانی	C ^{fat} _j
۲,۰۹۴,۰۰۰,۰۰۰ ریال بر نفر (وضعیت وخیم)			
۱۲۲,۴۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ریال بر نفر			

۴- مطالعات عددی

۴-۱- مدلسازی اولیه

روشی که در بخش قبل توضیح داده شد برای تعیین و مقایسه LCC بهینه شش سازه فولادی ۷، ۱۰ و ۱۳ طبقه منظم و نامنظم پس‌نشسته استفاده می‌شود. ابتدا مدل‌ها در رویت مدل گردید. مطابق شکل ۷، برای ساختمان‌های منظم، ۳ دهانه مساوی ۵ متری در هر دو جهت مدل سازی شده‌اند. ارتفاع هر طبقه ۳،۲ متر است. بنابراین ارتفاع سازه ۷، ۱۰ و ۱۳ طبقه به ترتیب برابر با ۲۲،۴، ۳۲ و ۴۱،۶ متر می‌باشد. برای بررسی اثرات نامنظمی، سه نوع سازه مذکور مطابق با شکل ۸ به صورت پس‌نشسته مدل می‌شوند. سازه‌ای نامنظم پس‌نشسته است که ابعاد افقی یک طبقه بیشتر از ۱۳۰٪ طبقات مجاور آن باشد [۵۸]. بنابراین با توجه اینکه ابعاد سازه‌ها در جهت Y در دو طبقه مجاور ۵ متر بایکدیگر اختلاف دارد (در یک طبقه ۱۵۰٪ و در یک طبقه ۲۰۰٪ بیشتر از طبقه پایین است). سازه‌ها نامنظم پس‌نشسته هستند. پلان‌های طبقات نیز در شکل ۹ قابل مشاهده است.

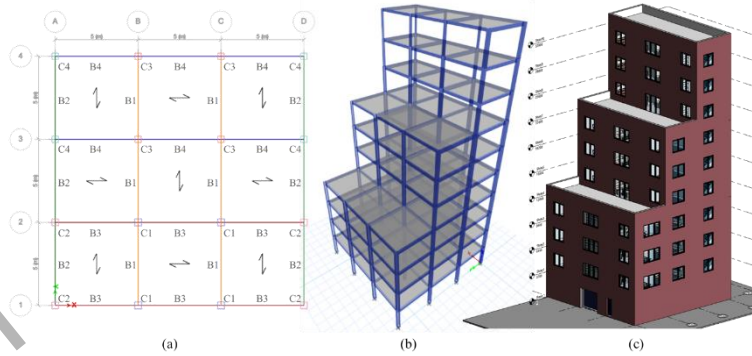
موقعیت سازه‌ها در تهران فرض شده‌اند. مطابق مقررات ملی ساختمان ایران - مبحث ۶، بیشینه شتاب زمین (PGA) ۰،۳۵ در نظر گرفته می‌شود. مطابق منحنی خطری که تیسنگ^۱ و همکارانش برای تهران ارائه کردند [۵۹]، PGA برای زلزله‌ها با احتمال فراگذشت سالانه 2475^{-1} و 72^{-1} به ترتیب برابر ۰،۵۸ و ۰،۱۸ می‌باشد. با بدست آوردن نسبت این PGAs به PGA زلزله طرح، Sa معادل برای این سطوح خطر لرزه‌ای در شکل ۱۰ مقیاس شده‌اند. نوع خاک مطابق مبحث ۶ شماره II است. طراحی ساختمان‌ها براساس ضوابط قاب خمشی ویژه مقررات ملی ساختمان ایران - مبحث ۱۰ انجام می‌شود. کاربری ساختمان‌ها مسکونی فرض می‌شوند و مطابق ASCE41-17 برای سطح عملکرد LS مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.



شکل ۷- (a) پلان تیپ بندی مقاطع سازه‌های منظم، (b) نمای سه بعدی اکسپورت شده در ایتبس و (c) نمای سه بعدی مدل شده در رویت سازه‌ی ۱۰ طبقه منظم

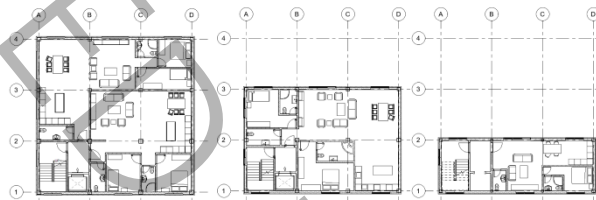
Fig.7. (a) Typical plan of sections of regular structures, (b) 3D view modeled in ETABS, and (c) 3D view modeled in Revit of the 10-story regular structure

^۱ Tsang



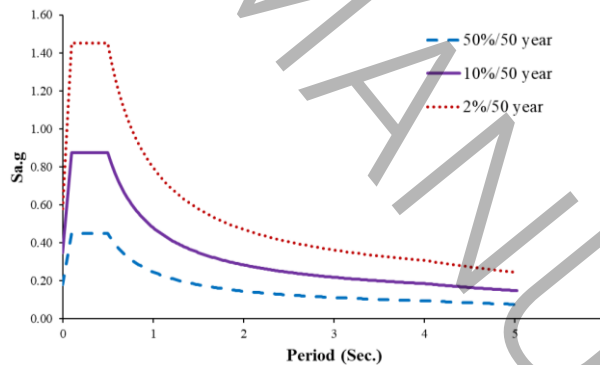
شکل ۸ - (a) پلان تیپ بندی مقاطع سازه‌های نامنظم پس‌نشسته، (b) نمای سه بعدی اکسپورت شده در ایتبس و (c) نمای سه بعدی مدل شده در رویت سازه‌ی ۱۰ طبقه نامنظم پس‌نشسته

Fig.8. (a) Typical plan of sections of irregular structures, (b) 3D view modeled in ETABS, and (c) 3D view modeled in Revit of the 10-story setback irregular structure



شکل ۹ - پلان‌های طبقات مختلف

Fig.9. Plans of different floors

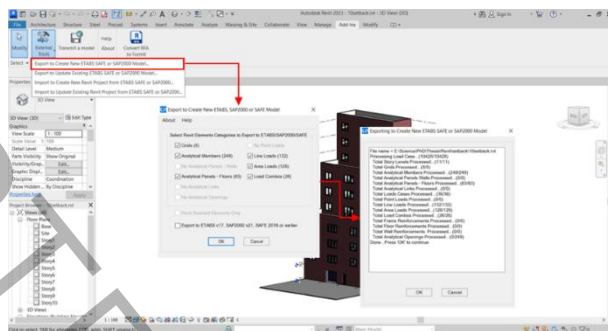


شکل ۱۰ - شتاب طیف ۲، ۱۰ و ۵۰ درصد احتمال فراگذشت بیش از ۵۰ سال برای تهران با نوع خاک II ($V_s = 375-750\text{m/s}$)

Fig.10. Spectrum accelerations of 2%, 10%, and 50% probability of exceedance over 50 years for Tehran with the soil of Type II ($V_s = 375-750\text{ m/s}$)

برای در نظر گرفتن اثر بارهای متعامد و نزدیکی نتایج به واقعیت، ساختمان‌ها به صورت سه‌بعدی مدل گردید. بار زنده کف بام 2 kg/m^2 و 150 kg/m^2 و مابقی طبقات 200 kg/m^2 و بار مرده کف طبقات 650 kg/m^2 در نظر گرفته و 250 kg/m^2 بار دیوارهای پیرامونی به صورت خطی به تیرهای پیرامونی اعمال شد. سقف طبقات از نوع کامپوزیت با عمق بتن 9 cm با مقاومت نهایی 28 Mpa و عرشه فولادی به عمق $7/5\text{ cm}$ با مقاومت نهایی 370 Mpa مدل گردید. برای اطمینان از توزیع مساوی بار روی اعضای سازه‌ای، مدلسازی سقف‌های کامپوزیت به صورت شطرنجی در نظر گرفته شد. برای محاسبه بار زلزله از ترکیب 100% بار مرده و 20% بار زنده به منظور یافتن جرم مورد نیاز استفاده گردید. فشردگی لرزه‌ای تمام مقاطع طبق مبحث 10 کنترل شده است. تکیه‌گاه‌ها ثابت و کف‌ها و اتصالات قاب، صلب فرض شد.

با استفاده از پلاگین CSiXRevit مدل سازه از رویت به ایتبس مطابق شکل ۱۱ منتقل می‌گردد. برای تحلیل پوش‌آور از نرم افزار ایتبس ۱۸ در این کار استفاده شده است. با استفاده از تعریف پلاستیسیته توده‌ای^۱ مکان‌های بالقوه تشکیل مفصل‌های پلاستیک در فاصله ۰/۰۵ و ۰/۹۵ تیرها و ستون‌ها در نرم افزار تعریف شده‌اند. از آن‌جا که طبق پژوهش اینل و ازمین^۲ منحنی ظرفیت برای مدل مفصل پیش‌فرض برنامه‌های تحلیل برای ساختمان‌های مطابق با کدهای جدید معقول می‌باشد [۶۰]، برای این کار نیز از تنظیمات مفصل پلاستیک پیش‌فرض ایتبس که بر مبنای ASCE41-17 می‌باشد، استفاده شده است [۴۴].



شکل ۱۱ - انتقال مدل سازه از رویت به ایتبس

Fig.11. Transferring the structure model from Revit to ETABS

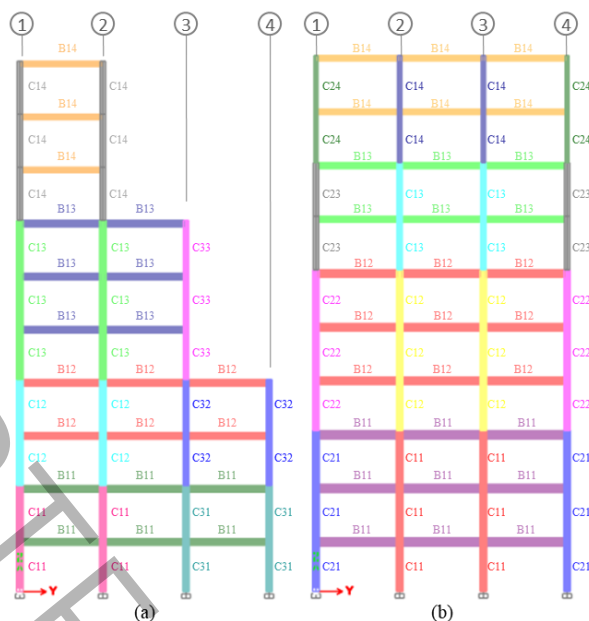
۲-۴- رویه بهینه‌سازی

به دو شیوه می‌توان بهینه‌سازی سازه را انجام داد: ۱. انتخاب مقاطع هر یک از تیرها و ستون‌های سازه به نحوی که بهینه‌ترین حالت ممکن بدست آید؛ ۲. تیپ‌بندی تیرها و ستون‌های سازه و انتخاب مقاطع تیپ‌ها برای دستیابی به حالت بهینه خواهد بود. علیرغم اینکه روش اول دقت بیشتری نسبت به روش دوم دارد اما زمان پردازش زیادی نیاز دارد و مورد استقبال طراحان و سازندگان نمی‌باشد. در عمل نیز المان‌های هر دو یا سه طبقه یک مقطع در نظر گرفته می‌شود. زیرا اولاً ورق فولادی تولید شده در کارخانه‌ها عموماً با طول ۶ متر (حدود ۲ طبقه) یا ۱۲ متر (حدود ۳ طبقه) می‌باشد، ثانیاً بدلیل اختلاف نسبت تنش حدود ۰,۳ ستون‌های هر دو یا سه طبقه، مقاطع تیپ غیراقتصادی نخواهد شد. به عنوان مثال سازه ۱۰ طبقه منظم مورد مطالعه، شامل ۲۴۰ تیر و ۱۶۰ ستون (مجموعاً ۴۰۰ عدد) است. در حالی که می‌توان ۲۰ عدد تیپ (۸ تیپ تیر، ۱۲ تیپ ستون) برای این سازه در نظر گرفت. مشخص است که سرعت بهینه سازی GA برای برداری با ۲۰ عضو بسیار کمتر از ۴۰۰ عضو می‌باشد.

بنابراین برای افزایش کارایی مدل و سرعت بهینه‌سازی، پس از آنکه مدل از رویت به ایتبس انتقال داده شد، با استفاده از دستور گروه‌بندی، علاوه بر تیپ‌بندی به نحو اشکال ۷ و ۸ در پلان، از منظر ارتفاع نیز تیرها و ستون‌ها به شکل بیان شده در بالا تیپ‌بندی می‌شوند. بدین ترتیب یک کروموزم GA، که بیانگر یک جواب ممکن مسئله است، برای سازه‌های ۷، ۱۰ و ۱۳ طبقه منظم به ترتیب دارای ۱۵ (۹ ستون (س) و ۶ تیر(ت))، ۲۰ (۱۲ س و ۸ ت) و ۲۵ (۱۵ س و ۱۰ ت) ژن و برای سازه‌های ۷، ۱۰ و ۱۳ طبقه نامنظم پس‌نشسته به ترتیب دارای ۲۰ (۱۰ س و ۱۰ ت)، ۲۷ (۱۴ س و ۱۳ ت) و ۳۶ (۲۰ س و ۱۶ ت) ژن می‌باشد. برای درک بهتر، مقاطع تیپ‌بندی سازه‌ی ۱۰ طبقه منظم و نامنظم پس‌نشسته در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند.

^۱ Lumped plasticity

^۲ Inel and Ozmen



شکل ۱۲- نمای C تیپ بندی مقاطع (a) سازه‌های نامنظم پس‌نشسته ۱۰ طبقه و (b) سازه‌های منظم ۱۰ طبقه (عدد اول مربوط به تیپ‌بندی پلان و عدم دوم ارتفاع)

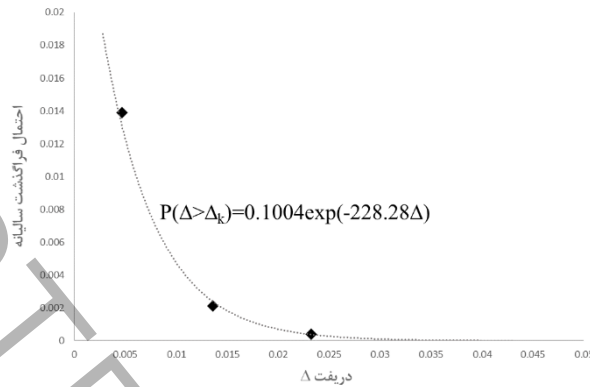
Fig.12. The sections type-casting of Section C of (a) 10-story setback irregular and (b) 10-story regular structures (The first number is related to the plan, and the second to the height)

برای پیاده سازی متدلوژی مطرح شده، با استفاده از API نویسی، متلب، ایتبس و دیتابیس اکسل به یکدیگر مرتبط می‌شوند. هنگامی که مدل طبق توضیحات بالا آماده شد، از طریق کدهای الگوریتم NSGA-II در متلب اقدام به تغییر المان‌های هرتیپ، بررسی قیود آیین‌نامه، انجام آنالیز پوش‌آور برای یافتن منحنی نیرو-جابجایی سازه، محاسبه احتمال فراگذشت سالیانه (\bar{P}) برای هر حالت خرابی و در نهایت بررسی تابع هدف گردید. با توجه به اینکه سطح مقطع فولاد از میان مقاطع از پیش تعریف شده انتخاب می‌شود؛ بنابراین، مسئله بهینه‌سازی در یک فضای گسسته خواهد بود. جمعیت اولیه به طور تصادفی از مقاطع تعریف شده IPE برای تیرها و Box برای ستون‌ها انتخاب خواهد شد. پارامترهای مهم GA نیز در این مطالعه بصورت: حداکثر تکرارها = ۱۰۰، اندازه جمعیت = ۵۰، درصد ترکیب = ۷۰٪، درصد جهش = ۴۰٪ و نرخ جهش = ۰.۰۲ در نظر گرفته می‌شود.

پس از آن که هر سازه‌ای قیود اولیه طراحی را جوابگو بود، در قدم بعدی GA سازه‌ها را مورد ارزیابی توابع هدف هزینه اولیه سازه و هزینه چرخه عمر (رجوع شود به ۳،۳) قرار می‌دهد. هزینه اولیه ساختمان به عوامل زیادی مانند موقعیت جغرافیایی، تعداد طبقات، نوع سازه، کیفیت مصالح و غیره بستگی دارد. بر اساس اطلاعات نظام مهندسی ساختمان تهران و دریافت نظرات پنل خبرگان حوزه ساخت‌وساز، هزینه‌های ساخت در تهران با مصالح و کیفیت خوب به طور میانگین برای ساختمان‌های ۷، ۱۰ و ۱۳ طبقه به ترتیب برابر ۱۲۳، ۱۳۸ و ۱۶۰ میلیون ریال بر مترمربع در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه هزینه‌های اولیه ساختمان از یک هزینه ثابت (۳۵٪ هزینه‌های ساخت [۶۱]) به عنوان هزینه تاسیسات مکانیکی، برقی و لوله‌کشی، هزینه‌های ابنیه غیرسازه‌ای با استفاده از استخراج مصالح از مدل رویت با داینامو به دیتابیس اکسل و هزینه سازه نیز با ضرب هزینه تیر و ستون مدل کاندید در وزن آن‌ها بدست می‌آید. برای هزینه تهیه و ساخت سازه فولادی نیز، طبق فهرست بهای ابنیه ایران و نظرات پنل خبرگان، به طور میانگین ۴۰۰۰۰۰ ریال بر کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌های غیرمستقیم LCC نیز از قسمت ۱،۳ و ۳،۳ بدست می‌آید. با توجه به آن‌که سازه‌ها بر اساس ضوابط قاب خمشی ویژه طراحی شده‌اند، بارهای جانبی در ۱۰۰ مرحله افزایشی به صورت کنترل جابجایی^۱ اعمال می‌شود تا زمانی که مطابق ASCE41-17 به جابجایی هدف موردنظر برای سازه برسد. با توجه به منحنی پوش‌آور و جابجایی هدف برای هر سه احتمال فراگذشت سالانه (زلزله‌های ۲، ۱۰ و ۵۰ درصد در ۵۰ سال)، سه جفت حداکثر دریافت بین طبقه و احتمال فراگذشت سالانه (Δ, P) برای هر مدل

^۱ Displacement-controlled

بدست خواهد آمد. سپس یک تابع نمایی به فرم فرمول ۱۴ با انجام رگرسیون توسط متلب برای سه نقطه برازش داده می‌شود. با استفاده از تابع منحنی بدست آمده و فرمول‌های ۱۲ و ۱۳، احتمالات سالانه فراگذشت هر یک از P_k برای هفت حالت آسیب معرفی شده در جدول ۱ بدست می‌آید. در نهایت با استفاده از فرمول ۱۱ هزینه چرخه عمر سازه محاسبه می‌گردد. به عنوان نمونه تمامی محاسبات مورد نیاز برای یک سازه بهینه ۷ طبقه منظم در شکل ۱۳ و جداول ۴ و ۵ آمده است.



شکل ۱۳- محاسبه احتمال فراگذشت سالیانه (\bar{P}) برای هر حالت خرابی یک نمونه مدل ۷ طبقه منظم

Fig.13. Calculation of annual exceedance probability (\bar{P}) for each damage state of a regular 7-story model

جدول ۴- محاسبه C_k یک نمونه مدل ۷ طبقه منظم با توجه به شرایط شهر تهران

Table 4. Calculation of C_k for a regular 7-story model according to Tehran's conditions

مجموع (C_k)	C_f	C_{inj}		C_e	C_r	C_p	C_{re}	سطح حالت حدی
		شدید	مختصر					
.	۱
۲۴۷۸/۳	۷/۷	۰/۵	۰/۴	۵۲۰/۵	۵۲۰/۵	۴۰۱/۶	۱۰۲۷	۲
۱۸۲۲۴/۶	۷۷/۱	۵/۳	۳/۸	۱۹۲۵/۹	۱۹۲۵/۹	۴۰۱۶/۳	۱۰۲۷۰/۴	۳
۷۲۳۵۱	۷۷۱/۱	۵۲/۸	۳۷/۶	۷۱۷۱/۴	۷۱۷۱/۴	۱۶۰۶۵	۴۱۰۸۱/۷	۴
۱۷۷۴۴۷/۱	۷۷۱۱/۲	۵۲۷/۷	۳۷۵/۶	۲۰۱۲۶/۲	۲۰۱۲۶/۲	۳۶۱۴۶/۳	۹۲۴۳۳/۹	۵
۴۷۱۴۸۱/۳	۷۷۱۱۲	۵۲۷۶/۹	۳۷۵۵/۸	۵۷۸۳۴	۵۷۸۳۴	۶۴۲۶۰	۲۰۵۴۰۸/۷	۶
۲۰۰۱۴۱۸/۲	۱۵۴۲۲۴۰	۵۲۷۶۸/۸	۵۰۰۷/۷	۵۷۸۳۴	۵۷۸۳۴	۸۰۳۲۵	۲۰۵۴۰۸/۷	۷

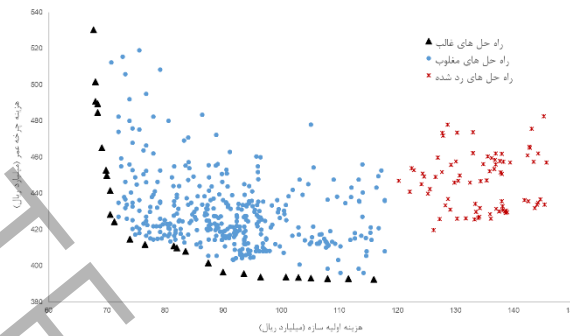
جدول ۵- محاسبه هزینه‌های غیرمستقیم یک نمونه مدل ۷ طبقه منظم

Table 5. Calculation of indirect costs for a regular 7-story model

$P_k \cdot C_k$	C_k	P_k	$P_{k+1}(\Delta > \Delta_{k+1})$	$P_k(\Delta > \Delta_k)$	$\bar{P}_k(\Delta > \Delta_k)$	دریفت Δ_k	حالت خرابی
.	.	۰/۰۴۰۰۹۳	-۰/۰۶۵۷۱۲	-۰/۱۰۵۸۰۵	۰/۱۰۰۴۰۰	.	۱
۸۲/۱	۲۴۷۸/۳	۰/۰۳۳۱۲۲	-۰/۰۳۲۵۹۰	-۰/۰۶۵۷۱۲	۰/۰۶۳۵۹۹	۰/۰۰۲	۲
۲۲۰	۱۸۲۲۴/۶	۰/۰۱۲۰۶۹	-۰/۰۲۰۵۲۱	-۰/۰۳۲۵۹۰	۰/۰۳۲۰۶۵	۰/۰۰۵	۳
۱۲۴۷/۷	۷۲۳۵۱	۰/۰۱۷۲۴۵	-۰/۰۰۳۲۷۶	-۰/۰۲۰۵۲۱	۰/۰۲۰۳۱۲	۰/۰۰۷	۴
۵۲۲/۱	۱۷۷۴۴۷/۱	۰/۰۰۲۹۴۲	-۰/۰۰۰۳۳۴	-۰/۰۰۳۲۷۶	۰/۰۰۳۲۷۱	۰/۰۱۵	۵
۱۵۶/۸	۴۷۱۴۸۱/۳	۰/۰۰۰۳۳۳	-۱/۱۱*۱۰ ^{-۶}	-۰/۰۰۰۳۳۴	۰/۰۰۰۳۳۴	۰/۰۲۵	۶
۲/۲۲	۲۰۰۱۴۱۸/۲	-۱/۱۱*۱۰ ^{-۶}	.	-۱/۱۱*۱۰ ^{-۶}	۱/۱۱*۱۰ ^{-۶}	۰/۰۵	۷
۲۲۳۰/۹							مجموع
۱۸/۳۵۸۳							$\frac{V}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t})$

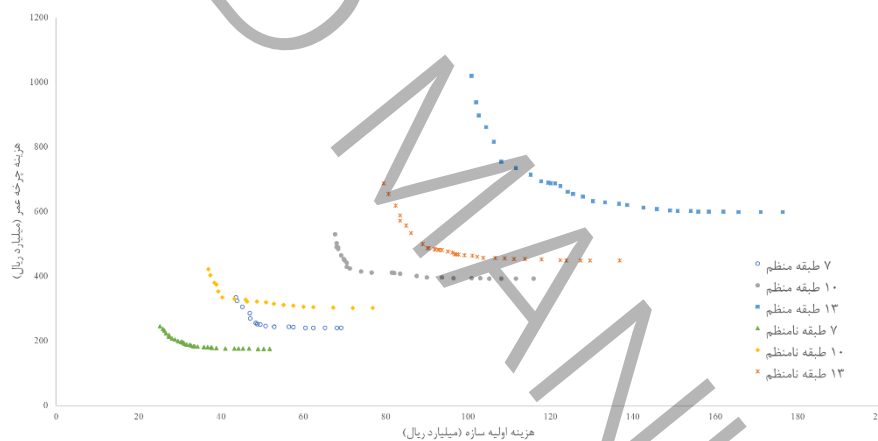
۴-۳- نتایج

NSGA-II پس از تولید و تحلیل ۵۰۰ نسل سازه، از طریق ارائه پارتو فرانت، بهترین جواب‌های ممکن را ارائه می‌نماید. پارتو فرانت بدست آمده برای سازه‌های ۱۰ طبقه منظم در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. برای مقایسه سازه‌های منظم و نامنظم و همچنین تاثیر ارتفاع سازه بر LCC آن، تمامی پارتو فرانت‌های بدست‌آمده در شکل ۱۵ کنار یکدیگر قرار داده شده است.



شکل ۱۴- نمودار پارتو فرانت سازه‌های منظم ۱۰ طبقه با استفاده الگوریتم NSGA-II

Fig.14. Pareto front of 10-story regular structures using NSGA-II algorithm



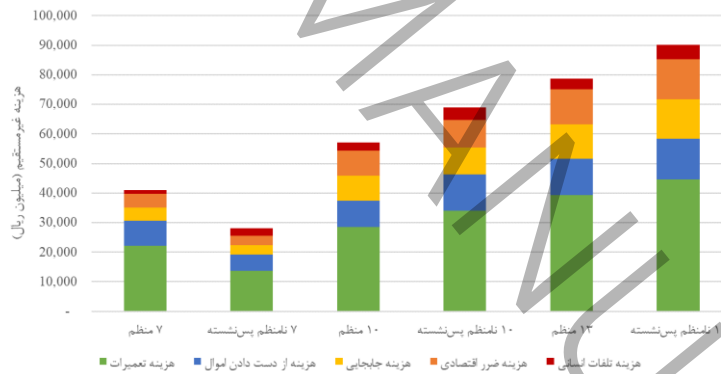
شکل ۱۵- مقایسه نمودار پارتو فرانت سازه‌های منظم و نامنظم پس‌نشسته

Fig.15. Comparison of Pareto front of regular and setback irregular structures

- مطابق شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود که هر چه هزینه اولیه سازه افزایش می‌یابد، LCC ساختمان کاهش می‌یابد. اما افزایش هزینه اولیه از نقطه‌ای به بعد دیگر تاثیر محسوسی بر کاهش LCC ندارد. به تعبیری کاهش هزینه ثانویه کمتر از افزایش هزینه اولیه سازه می‌باشد، مثلا در انتهای نمودار سازه ۱۰ طبقه منظم با حدود ۳٪ افزایش هزینه اولیه، LCC کاهش می‌یابد. لذا با توجه به اینکه هزینه‌های ثانویه براساس احتمالات بوده و در سالیان طولانی ایجاد خواهد شد، استفاده از این گزینه‌ها که هزینه اولیه بسیار زیادی دارد، منطقی نمی‌باشد.
- اثر نامنظمی در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها به حدی مشهود است که LCC سازه‌ها را به طرز قابل توجهی تحت اثر خود تغییر می‌دهد. بنحوی که در سازه ۷ طبقه منظم با افزایش ۱۶٪ هزینه اولیه می‌توان حدود ۲۶٪ هزینه‌های چرخه عمر را کاهش داد، در حالی که با ۳۵٪ افزایش هزینه اولیه سازه ۷ طبقه نامنظم setback حدود ۳۷٪ LCC کاهش می‌یابد. در مورد ساختمان ۱۰ طبقه منظم و نامنظم به ترتیب با افزایش ۲۲٪ و ۲۷٪ هزینه اولیه ۳۲٪ LCC کاهش می‌یابد. در مورد سازه ۱۳ طبقه نیز با افزایش ۱۷٪ هزینه اولیه می‌توان حدود ۴۸٪ و ۴۰٪ به ترتیب LCC سازه منظم و نامنظم را کاهش داد. از مقایسه این موارد می‌توان به این نکته نیز پی برد که سازه‌های بلندمرتبه حساسیت بیشتری به هزینه اولیه و چرخه عمر دارند بنحوی که با افزایش کمتری در هزینه‌های

اولیه، هزینه چرخه عمر کاهش بیشتری می‌یابد. دلیل این امر نیز می‌تواند آن باشد که اولاً اثرات زلزله بر ساختمان با افزایش ارتفاع، بیشتر می‌شود؛ ثانیاً به دلیل افزایش مساحت، تعداد انسان‌ها و محتوای بیشتری در خطر آسیب قرار می‌گیرند.

- از منظر منظمی و نامنظمی، در سازه هفت طبقه منظم در برابر تغییرات هزینه اولیه نسبت به نامنظم حساس‌تر می‌باشد. مثلاً در گزینه‌های میانه نمودار پارتو ساختمان ۷ طبقه منظم، افزایش هزینه اولیه سازه ۱/۵ برابر اثر بیشتری بر LCC نسبت به ساختمان نامنظم می‌گذارد. نسبت دلیل این امر نیز آن است که سازه منظم مساحت بیشتری داشته، به تبع افراد و وسایل بیشتری در آن خواهند بود و در نتیجه سازه هزینه‌های ثانویه بیشتری را متحمل خواهد شد. اما این اختلاف مساحت در مورد رفتار سازه‌های منظم و نامنظم ۱۰ و ۱۳ طبقه تاثیری نداشته و حتی سازه‌های نامنظم با وجود آنکه مساحت کمتری نسبت به سازه‌ها منظم دارند، رفتارهای حساس‌تری در برابر هزینه اولیه نشان می‌دهند. با مقایسه شیب نمودارهای دو سازه منظم و نامنظم ۱۰ طبقه می‌توان بیان کرد رفتار آن‌ها تقریباً مشابه یکدیگر است. اما در سازه‌های ۱۳ طبقه می‌توان متوجه حساسیت بیشتر LCC سازه‌های نامنظم به منظم نسبت به تغییرات وزن اولیه سازه شد. به عنوان مثال در میانه نمودار پارتو سازه ۱۳ طبقه منظم با ۲/۲٪ افزایش هزینه اولیه سازه، LCC کاهش می‌یابد در حالی که در سازه نامنظم با ۱/۱٪ افزایش هزینه اولیه این اتفاق می‌افتد. دلیل این امر نیز می‌تواند تشدید اثر نیروی لرزه‌ای با افزایش ارتفاع سازه بخصوص برای سازه‌های نامنظم باشد.
- عبارتی با توجه به مورد قبل هر چه ارتفاع سازه بیشتر می‌شود، اثر نامنظمی بر رفتار لرزه‌ای سازه و به تبع LCC آن نیز بیشتر نمایان می‌شود، بنحوی که در سازه ۷ طبقه، نامنظمی اثر چندانی بر رفتار LCC سازه نسبت به سازه منظم ندارد اما در سازه ۱۳ طبقه، با کاهش مقدار اندکی وزن سازه هزینه‌های ثانویه و به تبع LCC آن به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. شکل ۱۶ نیز نشانگر همین است که رفتار لرزه‌ای سازه نامنظم نسبت به منظم با خرابی بیشتری همراه است؛ بنحوی که هزینه‌های غیرمستقیم آن‌ها بیشتر از سازه‌های منظم می‌باشد. لذا با توجه به احتمال خرابی بیشتر سازه‌های نامنظم در زلزله پیشنهاد می‌شود در مناطق لرزه‌خیز تا حد امکان از بکارگیری این نوع نامنظمی بخصوص برای سازه‌های بلندمرتبه اجتناب کرده و یا از روش‌های مبتنی بر عملکرد برای سنجش گزینه‌های مختلف با رویکرد آینده‌نگری - و نه فقط رویکرد هزینه اولیه - استفاده گردد.



شکل ۱۶ - مقایسه هزینه‌های غیرمستقیم سازه‌های منظم و نامنظم پس‌نشسته

Fig.16. Comparison of indirect costs of regular and setback irregular structures

۵- جمع‌بندی

پارادایم استفاده از محاسبه هزینه چرخه عمر به طور فزاینده‌ای برای زیرساخت‌ها در حال توجه است. زیرا هزینه و اثرات یک پروژه ناشی از مجموعه اثراتی هستند که در طول چرخه عمر خواهد داشت. ساختمان‌های شهری نیز از این امر مستثنی نیستند به شکلی که خصوصاً در مناطق لرزه‌خیز یک تغییر کوچک در مرحله طراحی می‌تواند منجر به ایجاد هزینه‌های گزاف یا بالعکس منجر به جلوگیری از هدررفت سرمایه‌های اجتماعی گردد. در این مطالعه برخلاف بسیاری از آئین‌نامه‌های لرزه‌ای، که عمدتاً به هزینه‌های اولیه ساخت توجه می‌کنند، چارچوبی برای بهینه‌سازی طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی مبتنی بر عملکرد در طول چرخه عمر آن از طریق تعیین سطح خرابی شدت‌های مختلف زلزله‌های احتمالاتی ارائه گردید.

برای کاربردی کردن مدل، کاهش محدودیت‌های مطالعات قبلی، افزایش سرعت و دقت در محاسبات و کاهش دوباره‌کاری در فرآیند طراحی، در مدل مذکور به طور موثری از ظرفیت‌های BIM استفاده و یک مدل مدیریت یکپارچه BIM-LCC ارائه شد. استفاده از ابزارهای BIM توانست تا حد زیادی محدودیت‌های تحلیل LCC مانند زمان صرف‌شده در جمع‌آوری داده‌ها و تبادل اطلاعات را کاهش و دقت و سرعت محاسبات را افزایش دهد.

در ادامه از طریق مدلسازی سه‌بعدی سه تیپ سازه منظم و نامنظم پس‌نشسته ۷، ۱۰ و ۱۳ طبقه به بررسی اثرات نامنظمی بر روی LCC پرداخته شد. مدل‌ها در بستر BIM، با استفاده از نرم‌افزار رویت ایجاد و از طریق برنامه‌نویسی در متلب در یک فضای مشترک بین رویت، ایتبس و دیتابیس اکسل اقدام به پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی دوهدفه NSGA-II بر روی هر یک از سازه‌ها شد. تا در نهایت با موازنه هزینه اولیه و LCC هر یک از سازه‌ها یک نمودار پارتو فرانت به عنوان خروجی الگوریتم ارائه شده و سازه بهینه منتخب در مدل BIM به عنوان طرح خروجی بروزرسانی شود.

مدل ارائه شده در این پژوهش قابلیت بکارگیری در هر منطقه‌ای را داراست، اما مدل‌های مطالعه عددی آن از لحاظ لرزه‌خیزی و اطلاعات اقتصادی بسیار به منطقه مورد مطالعه وابسته است. با این حال مشاهدات نشان داد، بطور کلی هنگامی که طراحی با هدف به حداقل رساندن وزن اولیه سازه انجام شود، طرح حاصل در برابر زلزله‌های محتمل آینده می‌تواند مستعد خرابی و در نتیجه LCC بیشتری باشد؛ این هزینه بخصوص برای سازه‌های بلند و نامنظم تشدید خواهد شد. البته این نتایج نشان نمی‌دهد که بهینه‌سازی در حالت اول منجر به ساخت ساختمان‌های نامنظمی می‌شود که تحت تأثیر بارهای لرزه‌ای آسیب‌های شدید دیده و یا واژگون گردند؛ و یا از ساخت سازه‌های بلندمرتبه نامنظم در مناطق لرزه‌خیز جلوگیری شود. اما می‌توان استراتژی‌های سودآور اقتصادی برای طراحی چنین ساختمان‌هایی در نظر گرفت که ضمن ایجاد ایمنی بیشتر، LCC آن‌ها نیز کاهش داد. هزینه‌هایی که می‌تواند منجر به کاهش صدمات اجتماعی و اقتصادی و بخصوص تلفات انسانی گردد.

به طور خلاصه می‌توان نتایج بدست آمده از مطالعه عددی را به صورت زیر بیان کرد:

- هر چه ارتفاع سازه‌ای بیشتر شود، LCC در برابر هزینه اولیه سازه حساس‌تر خواهد شد؛ بگونه‌ای که کوچکترین تغییری در سازه اولیه می‌تواند اثرات قابل توجهی در بلند مدت داشته باشد.
- به طور کلی برای کاهش LCC سازه‌های نامنظم باید هزینه اولیه بیشتری نسبت به سازه‌های منظم صورت گیرد.
- هرچه ارتفاع سازه بلندتر می‌شود، محدوده مطلوب از دیدگاه اقتصادی در نمودار پارتو فرانت کوچکتر می‌شود. به عبارتی قبل از این محدوده، با کاهش اندکی هزینه‌ی اولیه سازه، LCC به شدت افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که نمودار پارتو فرانت دچار شکستگی محسوسی در آن ناحیه می‌گردد. بعد از این محدوده نیز با افزایش هزینه اولیه سازه، LCC تغییر محسوسی نمی‌کند و افزایش وزن اولیه سازه توجیه اقتصادی ندارد.
- همان‌گونه که نتایج نشان داد، ساختمان‌های ۷ و ۱۰ طبقه تفاوت‌های معناداری با یکدیگر نداشتند اما نتایج ساختمان‌های ۱۳ طبقه بسیار متفاوت‌تر از آن‌ها بود. لذا از منظر اقتصادی و شهری می‌توان این‌گونه برداشت کرد که، اگر شهری به دنبال ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه می‌باشد، تعداد طبقات از یک حدی کمتر تفاوت محسوسی با ساختمان‌های میان‌مرتبه ندارد. و باید حد مطلوب تعداد طبقات با توجه به اطلاعات اقتصادی و اجتماعی هر شهر محاسبه گردد تا ساختمان‌هایی با صرفه اقتصادی بیشتر احداث شوند.
- در مقایسه با پژوهش‌هایی که از روش‌های دستی و با تعداد محدودی مدل، فرآیندهای بهینه‌سازی را انجام داده‌اند، استفاده از الگوریتم الگوریتم ژنتیک دو هدفه برای بهینه‌سازی LCC منجر بر آن شد که با توجه به توان بررسی مدل‌های بیشتر بهینه‌سازی LCC سازه و کاهش وزن آن به صورت همزمان صورت گیرد.

۶- منابع

- [1] S.H. Sanati, A. Karamodin, Optimum seismic design of frame structures with and without metallic yielding dampers considering life-cycle cost, Journal of Building Engineering, 76 (2023).
- [2] C. Raposo, F. Rodrigues, H. Rodrigues, BIM-based LCA assessment of seismic strengthening solutions for reinforced concrete precast industrial buildings, Innovative Infrastructure Solutions, 4(1) (2019).

- [3] D.M.A. Morsi, W.S.E. Ismaeel, A. Ehab, A.A.E. Othman, BIM-based life cycle assessment for different structural system scenarios of a residential building, *Ain Shams Engineering Journal*, 13(6) (2022).
- [4] UNECE, Share of construction in GDP, in, United Nations Economic Commission for Europe.
- [5] Mehrnews, The contribution of the construction sector to the GDP, in, Mehrnews, 2021 (in Persian).
- [6] B. Behnam, F. Shojaei, A Risk Index for Mitigating Earthquake Damage in Urban Structures, in: *Integrating Disaster Science and Management*, 2018, pp. 3-25.
- [7] H. Jiang, Y. Huang, L. He, T. Huang, S. Zhang, Seismic performance of RC frame-shear wall structures with vertical setback, *Structures*, 33 (2021) 4203-4217.
- [8] T. Vasishta, M. Hashem Mehany, J. Killingsworth, Comparative life cycle assesment (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA) of precast and cast-in-place buildings in United States, *Journal of Building Engineering*, 67 (2023).
- [9] J. Li, F. Xiao, L. Zhang, S.N. Amirkhani, Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review, *Journal of Cleaner Production*, 233 (2019) 1182-1206.
- [10] S. Pezeshk, C.V. Camp, D. Chen, Design of Nonlinear Framed Structures Using Genetic Optimization, *Journal of Structural Engineering*, 126(3) (2000) 382-388.
- [11] J.M. Galibourg, Public works and overall cost. A current approach for public construction. Guide for project owners, for a 'total cost' approach to public construction, in, *Interministerial Mission for the Quality of Public Construction*, Paris, 2006.
- [12] Y.K. Wen, Y.J. Kang, Minimum building life-cycle cost design criteria. I: Methodology, *Journal of Structural Engineering*, 127(3) (2001) 330-337.
- [13] A.H.S. Ang, J.-C. Lee, Cost optimal design of R/C buildings, *Reliability Engineering & System Safety*, 73(3) (2001) 233-238.
- [14] K.C. Sarma, H. Adeli, Life-cycle cost optimization of steel structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 55(12) (2002) 1451-1462.
- [15] G. Li, G. Cheng, Damage-reduction-based structural optimum design for seismic RC frames, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 25(4) (2003) 294-306.
- [16] M. Liu, Y.K. Wen, S.A. Burns, Life cycle cost oriented seismic design optimization of steel moment frame structures with risk-taking preference, *Engineering Structures*, 26(10) (2004) 1407-1421.
- [17] H. Shin, M.P. Singh, Minimum failure cost-based energy dissipation system designs for buildings in three seismic regions – Part II: Application to viscous dampers, *Engineering Structures*, 74 (2014) 275-282.
- [18] M. Heydari, G. Heravi, A BIM-based framework for optimization and assessment of buildings' cost and carbon emissions, *Journal of Building Engineering*, 79 (2023).
- [19] Q. Tushar, M.A. Bhuiyan, G. Zhang, T. Maqsood, An integrated approach of BIM-enabled LCA and energy simulation: The optimized solution towards sustainable development, *Journal of Cleaner Production*, 289 (2021).
- [20] M. Sandberg, J. Mikkavaara, F. Shadram, T. Olofsson, Multidisciplinary optimization of life-cycle energy and cost using a BIM-based master model, *Sustainability*, 11(1) (2019).
- [21] S.D. Datta, M. Islam, M.H. Rahman Sobuz, S. Ahmed, M. Kar, Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review, *Heliyon*, 10(5) (2024) e26888.
- [22] X. Gao, P. Pishdad-Bozorgi, BIM-enabled facilities operation and maintenance: A review, *Advanced Engineering Informatics*, 39 (2019) 227-247.
- [23] M.A.H. Rad, F. Jalaei, A. Golpour, S.S.H. Varzande, G. Guest, BIM-based approach to conduct life cycle cost analysis of resilient buildings at the conceptual stage, *Automation in Construction*, 123 (2021).
- [24] A. Hollberg, G. Genova, G. Habert, Evaluation of BIM-based LCA results for building design, *Automation in Construction*, 109 (2020).
- [25] D. Zhuang, X. Zhang, Y. Lu, C. Wang, X. Jin, X. Zhou, X. Shi, A performance data integrated BIM framework for building life-cycle energy efficiency and environmental optimization design, *Automation in Construction*, 127 (2021).
- [26] B.S. Dhillon, *Life cycle costing for engineers*, CRC Press, 2009.
- [27] R. Santos, A.A. Costa, J.D. Silvestre, L. Pyl, Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment, *Automation in Construction*, 103 (2019) 127-149.
- [28] R.L. Haupt, S.E. Haupt, *Practical genetic algorithms*, John Wiley & Sons, 2004.

- [29] J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, MIT press, 1992.
- [30] Y. Yonezawa, T. Kikuchi, Ecological algorithm for optimal ordering used by collective honey bee behavior, in: *MHS'96 Proceedings of the Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science*, IEEE, 1996, pp. 249-256.
- [31] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Coloni, Ant system: optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern*, 26(1) (1996) 29-41.
- [32] S. Bakhshinezhad, M. Mohebbi, Multi-objective optimal design of semi-active fluid viscous dampers for nonlinear structures using NSGA-II, *Structures*, 24 (2020) 678-689.
- [33] M. Liu, S.A. Burns, Y.K. Wen, Multiobjective optimization for performance-based seismic design of steel moment frame structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(3) (2004) 289-306.
- [34] A. Kaveh, K. Laknejadi, B. Alinejad, Performance-based multi-objective optimization of large steel structures, *Acta Mechanica*, 223(2) (2011) 355-369.
- [35] M. Charkhtab Basim, H. E. Estekanchi, A. Vafai, A methodology for value based seismic design of structures by the endurance time method, *Scientia Iranica*, 23(6) (2016) 2514-2527.
- [36] H.S. Park, D.C. Lee, B.K. Oh, S.W. Choi, Y. Kim, Performance-based multiobjective optimal seismic retrofit method for a steel moment-resisting frame considering the life-cycle cost, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014 (2014) 1-14.
- [37] H. Shin, M.P. Singh, Minimum life-cycle cost-based optimal design of yielding metallic devices for seismic loads, *Engineering Structures*, 144 (2017) 174-184.
- [38] U. Vitiello, V. Ciotta, A. Salzano, D. Asprone, G. Manfredi, E. Cosenza, BIM-based approach for the cost-optimization of seismic retrofit strategies on existing buildings, *Automation in Construction*, 98 (2019) 90-101.
- [39] M. Fragiadakis, N.D. Lagaros, M. Papadrakakis, Performance-based multiobjective optimum design of steel structures considering life-cycle cost, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 32(1) (2006) 1-11.
- [40] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyariyan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2) (2002) 182-197.
- [41] BSSC, NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450), Part 1: Provisions, NIBS (National Institute of Building Sciences), Washington, DC, USA, 2003.
- [42] C.A. Cornell, H. Krawinkler, Progress and challenges in seismic performance assessment, *PEER newsletter*, 3(2) (2000) 1-3.
- [43] A. Homaifar, C.X. Qi, S.H. Lai, Constrained optimization via genetic algorithms, *Simulation*, 62(4) (2016) 242-253.
- [44] ASCE, *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*, American Society of Civil Engineers, 2017.
- [45] Y.K. Wen, Y.J. Kang, Minimum building life-cycle cost design criteria. II: Applications, *Journal of Structural Engineering*, 127(3) (2001) 338-346.
- [46] G. Abdoli, Estimation of social discount rate for Iran, *Economic Research Review*, 10(3) (2009) 135-156 (in Persian).
- [47] ATC, ATC-13: *Earthquake damage evaluation data for California*, Applied Technology Council: Redwood City, CA, USA, 1985.
- [48] M.-C. Lin, H.P. Tserng, S.-P. Ho, D.-L. Young, Developing a construction-duration model based on a historical dataset for building project, *Journal of Civil Engineering and Management*, 17(4) (2011) 529-539.
- [49] O. Dursun, C. Stoy, Determinants of construction duration for building projects in Germany, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 19(4) (2012) 444-468.
- [50] J.A. Ujong, E.M. Mbadike, G.U. Alaneme, Prediction of cost and duration of building construction using artificial neural network, *Asian Journal of Civil Engineering*, 23(7) (2022) 1117-1139.
- [51] F. Shojaei, F. Tabatabai zavareh, F. Begdeli, S. Mirsaedi, Z. Khazaei, F. Azizi, An overview of the health service provision of the Social Security Organization, *Social Security Organization Research Institute*, 2021 (in Persian).
- [52] D.P. Rice, B.S. Cooper, The economic value of human life, *Am J Public Health Nations Health*, 57(11) (1967) 1954-1966.
- [53] E.J. Mishan, Evaluation of life and limb: a theoretical approach, *Journal of Political Economy*, 79(4) (1971) 687-705.

- [54] W. Max, D.P. Rice, H.-Y. Sung, M. Michel, Valuing human life: estimating the present value of lifetime earnings, 2000, (2004).
- [55] T.R. Miller, Variations between countries in values of statistical life, *Journal of transport economics and policy*, (2000) 169-188.
- [56] M. Rezaei, H. Ranjbar, H. Talkhabi, Evaluation of sustainability indicators of Tehran metropolis based on sustainable development, in: *The first national conference on architecture, civil engineering and urban environment*, Hamedan, Iran, 2014 (in Persian).
- [57] BSSC, A benefit-cost model for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 227), FEMA (USA Federal Emergency Management Agency), Washington, D.C., USA., 1992.
- [58] D.P. Soni, B.B. Mistry, Qualitative review of seismic response of vertically irregular building frames, *ISET Journal of Earthquake Technology*, Technical Note, 43(4) (2006) 121-132.
- [59] H.-H. Tsang, S. Yaghmaei-Sabegh, P. Anbazhagan, M. Neaz Sheikh, A checking method for probabilistic seismic-hazard assessment: case studies on three cities, *Natural Hazards*, 58(1) (2010) 67-84.
- [60] M. Inel, H.B. Ozmen, Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings, *Engineering Structures*, 28(11) (2006) 1494-1502.
- [61] K. Haugbølle, L.M. Raffnsøe, Rethinking life cycle cost drivers for sustainable office buildings in Denmark, *Facilities*, 37(9/10) (2019) 624-638.

An Integrated BIM-Based Life Cycle-Oriented Framework for Seismic Design of High-Rise Steel Structures

Sajad Taheri Jebelli^a, Behrouz Behnam^{b1}

^a School of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology

^b School of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology

ABSTRACT

In general, the dominant strategy in the design of structures is to reduce the initial weight of the structure. Of course, the possible future costs such as damages caused by earthquakes are generally ignored. Considering the variety of urban buildings from the point of view of regularity and irregularity, it is important to examine their life cycle cost (LCC); this issue has not yet been fully explored in previous research. On the one hand, the lack of utilization of building information modeling (BIM) in previous structural design-based LCC research is evident. This research aims to highlight the impact of irregularity on the LCC of structures by providing an integrated framework based on the seismic design optimization of structures by using LCC and BIM capacities. For this, a shared environment is created in MATLAB software, information is exchanged between Revit, Etabs, and Excel software, and optimization is done using NSGA-II for establishing a trade-off between initial cost and LCC. BIM tools can greatly reduce the limitations of LCC analysis, such as information exchange time, and increase the accuracy and speed of calculations. By modeling six models in two regular and irregular types, the framework of the research and the difference in the behavior of the structures are examined. The results showed that the indirect costs of irregular structures are more than the regular ones. In addition, the findings show that reducing the LCC of irregular structures compared to regular ones requires a higher initial cost percentage. For example, for regular and irregular 13-story structures, a 17% increase in the initial cost leads to a 48% and 40% reduction in their LCC, respectively.

KEYWORDS:

Irregular structures, building information modeling, life cycle cost, performance-based design, multi-objective optimization.

¹ Corresponding Author: Email: b.behnam@aut.ac.ir