

سازه‌های تاب‌آور اقلیمی و مهندسی مبتنی بر عملکرد در برابر بارهای حدی: چارچوبی یکپارچه برای طراحی، ارزیابی و بهینه‌سازی

مینا حاجی نظر کندی

گروه مهندسی مکانیک

mina.hnazari20@gmail.com

چکیده

تغییر اقلیم به‌طور فزاینده‌ای فراوانی و شدت بارهای حدی وارد بر سازه‌ها و زیرساخت‌های حیاتی را تغییر می‌دهد و پارادایم‌های سنتی طراحی سازه را که بر فرض ایستایی بارها و داده‌های تاریخی اقلیمی استوارند، با چالش‌های بنیادین مواجه می‌سازد. این مقاله به بررسی رویکردهای نوین در طراحی سازه‌های تاب‌آور اقلیمی و مهندسی مبتنی بر عملکرد در برابر بارهای حدی می‌پردازد. با تحلیل انتقادی ادبیات علمی اخیر، چارچوبی یکپارچه برای طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌ها در شرایط عدم ایستایی اقلیمی ارائه می‌شود که شامل ملاحظات چندخطری، اهداف عملکردی چندمعیاره و ادغام پایداری زیست‌محیطی است. یافته‌ها نشان می‌دهد که مهندسی مبتنی بر عملکرد باد به‌عنوان یک حوزه در حال بلوغ، مهندسی مبتنی بر عملکرد لرزه‌ای را به‌عنوان الگوی خود قرار داده و به سمت روش‌های بهینه‌سازی و یکپارچه‌سازی با تحلیل چرخه عمر حرکت می‌کند. طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان تحت عدم ایستایی اقلیمی، اعم از روش‌های ضرایب بار و مقاومت (LRFD) تطبیقی و رویکردهای احتمالاتی، به‌عنوان راهکارهای عملی برای حفظ شاخص قابلیت اطمینان هدف در شرایط متغیر اقلیمی معرفی می‌شوند. همچنین، مواد و سیستم‌های نوین از جمله آلیاژهای حافظه‌دار، میراگرهای اصطکاکی و سیستم‌های خودمرکزگرا، پتانسیل قابل توجهی برای کاهش آسیب و افزایش تاب‌آوری در برابر بارهای حدی دارند. این مقاله نتیجه می‌گیرد که گذار از طراحی تجویزی به طراحی مبتنی بر عملکرد چندهدفه و چندخطری، ضرورتی انکارناپذیر برای جوامع مهندسی در عصر تغییر اقلیم است.

واژگان کلیدی: تاب‌آوری اقلیمی، مهندسی مبتنی بر عملکرد، بارهای حدی، عدم ایستایی اقلیمی، طراحی چندخطری

۱. مقدمه

تغییر اقلیم به یکی از تعیین‌کننده‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم برای مهندسی عمران و زیرساخت‌های حیاتی تبدیل شده است. افزایش فراوانی و شدت رویدادهای حادی مانند طوفان‌های شدید، سیلاب‌های ناگهانی، بارش‌های سنگین، امواج گرمایی و خشکسالی‌های طولانی‌مدت، الگوهای تاریخی بارگذاری سازه‌ها را دگرگون ساخته است. در این میان، فرض بنیادین ایستایی بارهای اقلیمی که پایه و اساس آیین‌نامه‌های طراحی سازه در دهه‌های گذشته بوده است، به‌طور جدی مورد تردید قرار گرفته است. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که تغییر اقلیم می‌تواند منجر به افزایش منطقه‌ای فراوانی و شدت چندین نوع مخاطره زیست‌محیطی شود که ریسک وارد بر سیستم‌های زیرساختی و کاربران آن‌ها را افزایش می‌دهد (Devineni, & Ghosn, ۲۰۲۵).

پارادایم سنتی طراحی سازه که بر رویکردهای تجویزی و مبتنی بر مقاومت استوار است، به‌طور فزاینده‌ای برای مواجهه با پیچیدگی‌های ناشی از تغییر اقلیم ناکارآمد شناخته می‌شود. رویکردهای تجویزی سنتی، که در آن‌ها معیارهای طراحی صرفاً بر اساس حداقل‌های آیین‌نامه‌ای تعیین می‌شوند، قادر به تأمین عملکرد قابل قبول سازه در طول رویدادهای حادی نیستند (Arunachalam, & Spence, ۲۰۲۲). این محدودیت، انگیزه اصلی گذار به سمت مهندسی مبتنی بر عملکرد (PBE) را فراهم کرده است؛ پارادایمی که در آن اهداف عملکردی صریح توسط ذی‌نفعان تعریف شده و طراحی سازه بر اساس دستیابی به آن اهداف انجام می‌شود.

مهندسی مبتنی بر عملکرد در ابتدا در حوزه مهندسی زلزله ظهور یافت و سپس به‌تدریج به سایر حوزه‌های بارگذاری حادی از جمله باد، سیلاب و بارهای ترکیبی گسترش یافت. مهندسی مبتنی بر عملکرد باد (PBWE) به‌عنوان یک حوزه در حال رشد سریع، از الگوی مهندسی مبتنی بر عملکرد لرزه‌ای الهام گرفته و در حال توسعه روش‌های اختصاصی خود برای مقابله با چالش‌های منحصربه‌فرد بارگذاری بادی است (Arunachalam, & Spence, ۲۰۲۲). همزمان، مفهوم تاب‌آوری—که فراتر از مقاومت صرف در برابر فروپاشی، توانایی بازگشت سریع به عملکرد مطلوب پس از رویداد را نیز در بر می‌گیرد—به‌عنوان یک هدف طراحی جامع‌تر در حال تثبیت است.

مقاله حاضر با هدف ارائه یک مرور نظام‌مند و تحلیل انتقادی از رویکردهای نوین در طراحی سازه‌های تاب‌آور اقلیمی و مهندسی مبتنی بر عملکرد در برابر بارهای حادی تدوین شده است. سؤال اصلی پژوهش این است که چگونه می‌توان چارچوبی یکپارچه برای طراحی و ارزیابی سازه‌ها در شرایط عدم ایستایی اقلیمی ارائه کرد که هم اهداف عملکردی چندگانه را برآورده سازد و هم پایداری زیست‌محیطی را در نظر بگیرد. برای پاسخ به این سؤال، ابتدا مبانی نظری مهندسی مبتنی بر عملکرد و تاب‌آوری اقلیمی مرور می‌شود، سپس رویکردهای خاص برای بارهای باد، سیلاب و زلزله بررسی می‌گردد، در ادامه چارچوب‌های طراحی چندخطری و مبتنی بر قابلیت اطمینان تحلیل می‌شود و در نهایت، مواد و سیستم‌های نوین تاب‌آور معرفی می‌گردند.

۲. مبانی نظری: از طراحی تجویزی تا مهندسی مبتنی بر عملکرد تاب‌آور

۲.۱. محدودیت‌های پارادایم تجویزی

رویکردهای تجویزی سنتی در طراحی سازه، که عمدتاً بر تعیین حداقل مقاومت لازم برای مقابله با بارهای مشخص‌شده در آیین‌نامه استوارند، بر دو فرض بنیادین بنا شده‌اند: نخست، ایستایی آماری بارهای اقلیمی در طول عمر سازه، و دوم، کفایت معیارهای مقاومتی برای تضمین عملکرد مطلوب. با این حال، هر دو فرض در شرایط تغییر اقلیم معاصر دچار لرزش شده‌اند.

اسپنس و آرون‌چالام (Arunachalam, & Spence ۲۰۲۲) در مرور جامع خود بر مهندسی مبتنی بر عملکرد باد، محدودیت‌های رویکردهای تجویزی طراحی باد را به‌طور مستدل تشریح می‌کنند. آن‌ها نشان می‌دهند که چنین رویکردهایی برای تأمین عملکرد قابل قبول ساختمان در طول رویدادهای حدی باد ناکافی هستند، زیرا صرفاً بر معیارهای مقاومتی متمرکز شده و آسیب‌پذیری پوشش ساختمان، اجزای غیرسازه‌ای و پیامدهای عملکردی را نادیده می‌گیرند. این محدودیت، انگیزه اصلی حرکت به سمت استراتژی‌های مبتنی بر عملکرد در مهندسی باد است.

از منظر قابلیت اطمینان سازه، مسئله اساسی‌تر است. غصن و دیویننی (Devineni, & Ghosn ۲۰۲۵) در کار خود بر معیارهای طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان برای سازه‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تحت رویدادهای حدی در اقلیم در حال تغییر، این نکته را برجسته می‌سازند که داده‌های اقلیمی تاریخی—که پایه و اساس آیین‌نامه‌های طراحی فعلی را تشکیل می‌دهند—دیگر نماینده شرایط آینده نیستند. آن‌ها استدلال می‌کنند که رویکردهای سنتی مبتنی بر آمار ایستا، منجر به دست‌کم گرفتن بارهای طراحی و در نتیجه کاهش شاخص قابلیت اطمینان واقعی سازه در طول عمر مفید آن می‌شوند.

مطالعه‌ای تطبیقی بر روی آیین‌نامه‌های طراحی حرارتی سازه‌ها، که اخیراً منتشر شده است، نشان می‌دهد که آیین‌نامه‌های فعلی—از جمله مشخصات طراحی پل LRFD AASHTO (۲۰۲۴)—اغلب بر داده‌های اقلیمی تاریخی متکی هستند که قادر به در نظر گرفتن شتاب اخیر گرمایش جهانی نیستند (Actions, Temperature on Study Comparative). این مطالعه موردی هشداردهنده‌ای از ناکارآمدی پارادایم تجویزی در مواجهه با عدم ایستایی اقلیمی ارائه می‌دهد.

۲.۲. ظهور مهندسی مبتنی بر عملکرد

مهندسی مبتنی بر عملکرد (PBE) به‌عنوان پاسخی مستقیم به محدودیت‌های رویکردهای تجویزی شکل گرفت. در این پارادایم، به جای آنکه طراحی سازه صرفاً بر اساس معیارهای حداقل آیین‌نامه‌ای انجام شود، اهداف عملکردی صریح—مانند سطح آسیب قابل قبول، قابلیت استفاده پس از رویداد، و زمان بازگشت به عملکرد—توسط ذی‌نفعان تعریف شده و طراحی برای دستیابی به آن اهداف انجام می‌شود (Arunachalam, & Spence ۲۰۲۲).

تکامل PBE از مهندسی زلزله به سایر حوزه‌ها، الگوی نظری مهمی را آشکار می‌سازد. در مهندسی زلزله، چارچوب‌های ارزیابی عملکرد بالغی توسعه یافته‌اند که سطوح مختلف عملکردی (مانند قابلیت استفاده فوری، ایمنی جانی، جلوگیری از فروپاشی) را با سطوح مختلف خطر لرزه‌ای مرتبط می‌سازند. این چارچوب‌ها اخیراً برای ساختمان‌های موجود و با در نظر گرفتن سطوح

خطر واحد به کار گرفته شده‌اند، اما نیاز به گسترش به ساختمان‌های جدید و اهداف تاب‌آوری در مراحل اولیه طراحی احساس می‌شود (Bianchi, ۲۰۲۳).

مهندسی مبتنی بر عملکرد باد (PBWE) به‌عنوان حوزه‌ای که مستقیماً از PBE لرزه‌ای الهام گرفته، در حال توسعه چارچوب‌های اختصاصی خود است. چالش منحصربه‌فرد PBWE در مقایسه با PBE لرزه‌ای، ماهیت پایدارتر بار باد (در مقایسه با رویدادهای زلزله که ماهیت کوتاه‌مدت و شدید دارند) و اهمیت آسیب پوشش ساختمان در عملکرد کلی سازه است. اسپنس و آرون‌چالام (Arunachalam, & Spence, ۲۰۲۲) تأکید می‌کنند که آسیب اجزای غیرسازه‌ای و پوشش ساختمان، که در طراحی باد تجویزی نادیده گرفته می‌شود، می‌تواند سهم عمده‌ای در توقف عملکرد ساختمان پس از رویدادهای حدی باد داشته باشد.

۲.۳. تاب‌آوری اقلیمی به‌عنوان هدف طراحی جامع

مفهوم تاب‌آوری—که فراتر از مقاومت صرف در برابر فروپاشی، توانایی سیستم را برای جذب، تطبیق و بازیابی از رویدادهای مخرب در بر می‌گیرد—به‌عنوان یک هدف طراحی جامع‌تر در حال تثبیت است. استاندارد بین‌المللی ISO ۴۹۳۱-۱:۲۰۲۴، که اخیراً منتشر شده است، اصول، چارچوب و راهنمایی‌هایی را برای طراحی تاب‌آور اقلیمی (RDACC) در ساختمان‌ها و آثار مهندسی عمران ارائه می‌دهد (ISO, ۲۰۲۴).

این استاندارد، تاب‌آوری اقلیمی را نه فقط به‌عنوان توانایی مقاومت در برابر رویدادهای حدی کنونی، بلکه به‌عنوان ظرفیت تطبیق با شرایط اقلیمی در حال تغییر در طول عمر سازه تعریف می‌کند. این رویکرد، مستلزم گذار از طراحی یک‌باره به طراحی تطبیقی و انطباق‌پذیر است که در آن، سازه می‌تواند با تغییر شرایط اقلیمی، عملکرد مطلوب خود را حفظ کند.

بیانچی (Bianchi, ۲۰۲۳) در کار خود بر ادغام تاب‌آوری در طراحی چندخطری پایدار ساختمان‌ها، چارچوبی را پیشنهاد می‌کند که در آن، تاب‌آوری لرزه‌ای با ملاحظات پایداری زیست‌محیطی و تاب‌آوری اقلیمی ادغام می‌شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که راه‌حل‌های یکپارچه تاب‌آوری‌افزا می‌توانند منجر به کاهش قابل توجه اتلاف تاب‌آوری (بیش از ۸۰ درصد) و تخصیص کارآمدتر منابع شوند (Bianchi, ۲۰۲۳).

۳. مهندسی مبتنی بر عملکرد باد در برابر بارهای حدی

۳.۱. چالش‌های منحصربه‌فرد بار باد در عصر تغییر اقلیم

بار باد یکی از پیچیده‌ترین بارهای اقلیمی وارد بر سازه‌ها است، زیرا ماهیت تصادفی و وابسته به مکان دارد و از الگوهای غیرایستا پیروی می‌کند. تغییر اقلیم، این پیچیدگی را تشدید کرده است: پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تغییر اقلیم می‌تواند بر الگوهای

توفان‌های حدی و پیامدهای طراحی سازه در ایالات متحده تأثیر بگذارد (Snaiki, & Wu, ۲۰۲۵). این تأثیر شامل افزایش شدت توفان‌های استوایی، تغییر مسیرهای توفان، و افزایش فراوانی رویدادهای باد غیرهمرفتی است.

مهندسی مبتنی بر عملکرد باد (PBWE) به عنوان حوزه‌ای در حال بلوغ، چارچوبی را فراهم می‌کند که در آن، عملکرد ساختمان در طول رویدادهای باد حدی به‌طور صریح ارزیابی می‌شود. برخلاف طراحی تجویزی باد که صرفاً بر معیارهای مقاومتی متمرکز است، PBWE سه جنبه کلیدی عملکرد را در نظر می‌گیرد: پاسخ ساختاری حدی (شامل تغییر مکان‌های بزرگ و رفتار غیرخطی)، آسیب سیستم پوشش ساختمان، و عملکرد اجزای غیرسازه‌ای (Arunachalam, & Spence, ۲۰۲۲).

۳.۲. رویکردهای طراحی بهینه‌سازی شده برای بار باد

یکی از پیشرفت‌های مهم در PBWE، ادغام روش‌های بهینه‌سازی در فرآیند طراحی است. اسپنس و آرون‌چالام (Spence & Arunachalam, ۲۰۲۲) پتانسیل ادغام روش‌های بهینه‌سازی را شناسایی می‌کنند، هرچند دشواری محاسباتی مرتبط با این رویکردها را نیز می‌پذیرند. بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند به طراحان کمک کند تا تعادل بهینه‌ای بین هزینه اولیه، عملکرد سازه‌ای و تاب‌آوری در برابر بارهای حدی برقرار کنند.

رویکرد طراحی کمک‌شده با پایگاه داده (DAD_PBD) که اخیراً توسط مؤسسه ملی استاندارد و فناوری ایالات متحده (NIST) توسعه یافته است، ابزاری عملی برای طراحی مبتنی بر عملکرد باد ساختمان‌های بلند ارائه می‌دهد. نسخه ۲.۰ این نرم‌افزار، که در سال ۲۰۲۴ منتشر شده است، به مهندسان اجازه می‌دهد تا طراحی پیشرفته سازه‌های بلند با اشکال نامنظم را تحت مفهوم طراحی مبتنی بر عملکرد باد انجام دهند (NIST, ۲۰۲۴).

۳.۳. کاربردهای PBWE در ساختمان‌های بلند و سازه‌های خاص

در حوزه ساختمان‌های بلند، PBWE به‌طور فزاینده‌ای به عنوان رویکرد برتر در طراحی شناخته می‌شود. طراحی باد ساختمان‌های بلند با در نظر گرفتن اصلاح گوشه‌ها و رفتار غیرارتجاعی، یکی از زمینه‌های فعال پژوهش است (Buildings, Tall of Design Wind Performance-Based, ۲۰۲۴). اجازه دادن به رفتار غیرارتجاعی تحت بارهای حدی باد، یکی از راه‌حل‌های عملی برای دستیابی به سطوح عملکردی بالاتر در عین حفظ اقتصاد طراحی است.

کاربرد PBWE به سازه‌های خاص فراتر از ساختمان‌های بلند گسترش یافته است. ارزیابی مبتنی بر عملکرد باد یک دکل مخابراتی با استفاده از مدل بیزی سرعت باد حدی، نمونه‌ای از کاربرد این رویکرد در سازه‌های ویژه است (Joó, & Kenéz, ۲۰۲۴). همچنین، ارزیابی عملکرد باد ساختمان‌های بلند چوبی خودمرکزگرا تحت بارهای باد ریزش‌باد شبیه‌سازی شده، نشان‌دهنده گسترش PBWE به مصالح نوین و سیستم‌های سازه‌ای نوآورانه است (Wind Performance-Based Assessment, ۲۰۲۶).

جدول ۱ خلاصه‌ای از رویکردهای کلیدی PBWE و ویژگی‌های آن‌ها را ارائه می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه رویکردهای طراحی باد: از تجویزی تا مبتنی بر عملکرد

ویژگی	طراحی تجویزی سنتی	مهندسی مبتنی بر عملکرد باد (PBWE)	طراحی تاب‌آور اقلیمی
مبنای طراحی	آیین‌نامه‌های حداقل	اهداف عملکردی صریح	اهداف عملکردی چندگانه با ملاحظات اقلیمی
معیار پذیرش	مقاومت در برابر بار طراحی	سطوح آسیب قابل قبول	حفظ عملکرد در طول عمر سازه
در نظر گرفتن عدم ایستایی	خیر (فرض ایستایی)	محدود	بله (سناریوهای اقلیمی آینده)
ادغام چندخطری	خیر	در حال توسعه	بله (باد، سیل، زلزله)
ملاحظات پایداری	خیر	در حال ظهور	بله (چرخه عمر، کربن)
ابزارهای تحلیل	استاتیک معادل	دینامیک غیرخطی، شبیه‌سازی مونت کارلو	تحلیل چرخه عمر، شبیه‌سازی چندخطری
نمونه کاربرد	ساختمان‌های معمولی	ساختمان‌های بلند، سازه‌های خاص	زیرساخت‌های حیاتی، جوامع ساحلی

۴. طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان در شرایط عدم ایستایی اقلیمی

۴.۱. چالش عدم ایستایی بارهای اقلیمی

مفهوم عدم ایستایی—که در آن پارامترهای آماری توزیع بارهای اقلیمی در طول زمان تغییر می‌کنند—یکی از بنیادین‌ترین چالش‌هایی است که تغییر اقلیم برای مهندسی سازه ایجاد کرده است. غسن و دِوینِنی (Devineni, & Ghosn ۲۰۲۵) به‌طور مستدل نشان می‌دهند که معیارهای طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان سنتی، که بر فرض ایستایی آماری استوارند، در شرایط عدم ایستایی اقلیمی منجر به تخمین نادرست ریسک می‌شوند.

این مسئله به‌ویژه در مورد بارهای سیلاب حادث‌تر است. الگوریتم‌های طراحی مبتنی بر ضرایب بار و مقاومت (LRFD) سنتی، ضرایب اطمینان را بر اساس داده‌های تاریخی تعیین می‌کنند. اما در شرایطی که فراوانی و شدت سیلاب‌ها در حال افزایش است، این ضرایب دیگر نمایندهٔ ریسک واقعی نیستند. الحمید و همکاران (al et Alhamid, ۲۰۲۴a) He in cited as (۲۰۲۵, al et روشی نوین برای طراحی LRFD ارائه کرده‌اند که به‌طور اختصاصی عدم ایستایی ناشی از تغییر اقلیم را در نظر می‌گیرد.

۴.۲. رویکرد LRFD تطبیقی برای شرایط غیرایستا

رویکرد LRFD تطبیقی که توسط الحمید و همکاران (۲۰۲۴a) پیشنهاد شده است، فرآیندی چندمرحله‌ای را دنبال می‌کند. نخست، خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) با استفاده از تکنیک‌های تصحیح اریبی مانند نگاشت دلتای چندک، برای نمایش دقیق شرایط اقلیمی محلی تصحیح می‌شوند. سپس، این پیش‌بینی‌های اقلیمی تصحیح‌شده، تحلیل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی را با استفاده از ابزارهایی مانند مدل ارزیابی خاک و آب (SWAT) برای شبیه‌سازی رفتار حوضه آبخیز و دبی رودخانه تحت سناریوهای اقلیمی مختلف، تغذیه می‌کنند (al et He, ۲۰۲۵).

رویدادهای سیلاب حدی با استفاده از روش فراتر از آستانه (POT) در ترکیب با فرآیند پواسون ناهمگن و توزیع پارتو تعمیم‌یافته تحلیل می‌شوند. این رویکرد، پارامترهای وابسته به زمان متأثر از تغییر اقلیم را برای ارزیابی احتمالاتی حداکثر عمق سیلاب وارد می‌کند. قابلیت اطمینان سازه با استفاده از توابع حالت حدی برای مدل‌سازی حالت‌های شکست از جمله سرریز خاکریز و ناپایداری شیب ارزیابی می‌شود. تکنیک‌های عددی مانند تحلیل سطح پاسخ و روش‌های بهینه‌سازی متوالی برای محاسبه ضرایب جزئی وابسته به زمان به کار می‌روند (al et He, ۲۰۲۵).

این روش در مورد رودخانه آشیدا در شهر فوکویاما، ژاپن، به کار گرفته شده و در آن، ضرایب بار و مقاومت برای حفظ شاخص قابلیت اطمینان هدف تحت ریسک‌های در حال تحول ناشی از تغییر اقلیم تنظیم شده‌اند (al et He, ۲۰۲۵).

۴.۳. ارزیابی چرخه عمر تحت عدم ایستایی اقلیمی

ادغام تحلیل چرخه عمر با ارزیابی قابلیت اطمینان، یکی از پیشرفته‌ترین رویکردها برای مواجهه با عدم ایستایی اقلیمی است. هی و همکاران (al et He, ۲۰۲۵) چارچوب احتمالاتی چرخه عمر را معرفی کرده‌اند که اثرات ترکیبی بارش و مخاطرات لرزه‌ای را در نظر می‌گیرد. در این چارچوب، بارش با استفاده از فرآیند تجدید تصادفی متناوب و مخاطرات لرزه‌ای با فرآیند پواسون مدل‌سازی می‌شوند.

چهار سناریو ارزیابی می‌شود: بارش منفرد، زلزله منفرد، بارش پس از زلزله، و زلزله پس از بارش. شکنندگی شیب برای این سناریوها با استفاده از تحلیل‌های نشت و خطی معادل ارزیابی می‌شود. مطالعه موردی در شهر هیروشیما نشان می‌دهد که تعامل بین بارش و رویدادهای لرزه‌ای، احتمالات زمین‌لغزش چرخه عمر را به‌طور قابل توجهی تقویت می‌کند (al et He, ۲۰۲۵).

هی و همکاران (al et He, ۲۰۲۴) اهمیت پرداختن به تغییرپذیری بارش ناشی از تغییر اقلیم را برجسته می‌سازند و تأکید می‌کنند که چارچوب‌های ارزیابی ریسک باید مدل‌های شکنندگی شیب منطقه‌ای و داده‌های خطر با وضوح بالا را برای بهبود دقت ارزیابی‌ها و اطلاع‌رسانی به تصمیم‌گیری برای کاهش بلایا ترکیب کنند.

جدول ۲ خلاصه‌ای از رویکردهای طراحی و ارزیابی مبتنی بر قابلیت اطمینان را ارائه می‌دهد.

جدول ۲: رویکردهای طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان در شرایط عدم ایستایی اقلیمی

رویکرد	مبنا	مزیت اصلی	محدودیت اصلی	کاربرد نمونه
LRFD سنتی	آمار ایستا	سادگی و پذیرش گسترده	تخمین نادرست ریسک در اقلیم در حال تغییر	سازه‌های معمولی
LRFD تطبیقی	پیش‌بینی‌های اقلیمی + تحلیل احتمالاتی	حفظ قابلیت اطمینان هدف	نیاز به داده‌های اقلیمی دقیق	زیرساخت‌های آبی
تحلیل چرخه عمر احتمالاتی	فرآیندهای تصادفی چندخطی	در نظر گرفتن تعامل مخاطرات	پیچیدگی محاسباتی بالا	دامنه‌ها و شیب‌ها
طراحی مبتنی بر تاب‌آوری	اهداف عملکردی + قابلیت اطمینان	جامعیت و انعطاف‌پذیری	نیاز به تعریف اهداف ذی‌نفعان	جوامع و شبکه‌ها

۵. طراحی چندخطی و رویکردهای یکپارچه

۵.۱. ضرورت رویکرد چندخطی

رویدادهای اقلیمی حدی به‌ندرت به‌صورت منفرد رخ می‌دهند. سیلاب‌ها اغلب با بارش‌های سنگین و بادهای شدید همراه هستند؛ زلزله‌ها می‌توانند منجر به زمین‌لغزش و سیلاب شوند؛ و طوفان‌های ساحلی همزمان باد، موج و سیلاب را به همراه دارند. طراحی سازه‌ها برای مواجهه با یک مخاطره منفرد، بدون در نظر گرفتن تعاملات بین مخاطرات، می‌تواند منجر به تخمین نادرست ریسک و کاهش تاب‌آوری واقعی سازه شود.

فرانچینی و گالاسو (Galasso, & Franchini, ۲۰۲۳) و ایاناگونه و همکاران (al et Iannacone, ۲۰۲۳) بر نیاز به چارچوب‌های طراحی چندخطی ترکیب‌شده با تحلیل چرخه عمر تأکید می‌کنند. گونزالس-دوئنایس و همکاران (al et Gonzalez-Duenas, ۲۰۲۳) نیز بر اهمیت چارچوب‌های تاب‌آوری که اثرات تغییر اقلیم و اثرات آبشاری را در نظر می‌گیرند، تأکید دارند.

۵.۲. چارچوب RAMSSHEEP و توسعه آن

چارچوب RAMSSHEEP (Health, Security, Safety, Maintainability, Availability, Reliability, Politics and Economics, Environment, که اخیراً با رویکردهای مبتنی بر طبیعت (Solutions Nature-Based) تلفیق شده است. فرناندس و همکاران (al et Fernandes, ۲۰۲۶) نشان می‌دهند که تغییر اقلیم فراوانی و شدت مخاطرات طبیعی را افزایش می‌دهد و فشار مضاعفی بر سیستم‌های زیرساختی حیاتی وارد می‌کند. آن‌ها چارچوب RAMSSHEEP را برای پرداختن به این چالش‌ها از طریق راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت گسترش داده‌اند.

۵.۳. طراحی یکپارچه لرزه‌ای-اقلیمی

ادغام ملاحظات لرزه‌ای و اقلیمی در فرآیند طراحی، یکی از پیشرفته‌ترین رویکردها در مهندسی سازه معاصر است. بیانچی (Bianchi, ۲۰۲۳) چارچوبی چندمعیاره برای طراحی پوسته‌های ساختمان ارائه می‌کند که هم تاب‌آوری لرزه‌ای و هم تاب‌آوری حرارتی را در نظر می‌گیرد. این رویکرد، پوسته ساختمان را نه فقط به‌عنوان یک عنصر معمارانه، بلکه به‌عنوان یک سیستم چندعملکردی که باید در برابر هم زلزله و هم شرایط اقلیمی حدی مقاومت کند، در نظر می‌گیرد.

بیانچی (Bianchi, ۲۰۲۳) در کار خود بر تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های جدید با در نظر گرفتن تأثیر بلندمدت تغییر اقلیم، نشان می‌دهد که راه‌حل‌های یکپارچه می‌توانند به کاهش قابل توجه اتلاف تاب‌آوری منجر شوند. مطالعه موردی بر روی یک ساختمان چندطبقه شامل سیستم‌های مختلف مقاوم در برابر زلزله و کارآمد از نظر انرژی انجام شده است. تحلیل‌های ریسک لرزه‌ای و انرژی، شامل عدم قطعیت‌های معرفتی و تغییرپذیری زلزله/آب‌وهوا، انجام شده و نتایج برای تخمین و مقایسه اتلاف تاب‌آوری راه‌حل‌های طراحی جایگزین پردازش شده‌اند (Bianchi, ۲۰۲۳).

۵.۴. طراحی مبتنی بر تاب‌آوری برای پل‌ها و زیرساخت‌های حمل‌ونقل

پل‌ها به‌عنوان گره‌های حیاتی شبکه‌های حمل‌ونقل، در برابر بارهای حدی چندگانه آسیب‌پذیر هستند. رحمان و همکاران (al et Rahman, ۲۰۲۴) تاب‌آوری پل‌های ساحلی تحت بارهای موج‌القابی حدی را بررسی کرده‌اند. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که طراحی سنتی پل‌های ساحلی، که عمدتاً بر بارهای ثقلی و لرزه‌ای متمرکز است، برای مواجهه با بارهای موجی ناشی از توفان‌های حدی کافی نیست.

مطالعه‌ای در مورد سیلاب ویرانگر ۲۹ اکتبر ۲۰۲۴ در جنوب غربی والنسیا، آسیب گسترده به زیرساخت‌های پل را نشان داد و آسیب‌پذیری قابل توجه آن‌ها در برابر رویدادهای هیدرولیکی حدی را آشکار ساخت (Guidelines the Rethinking Bridges, River-Crossing Resilient for ۲۰۲۶). این مطالعه، مجموعه اولیه‌ای از دستورالعمل‌های طراحی را برای بهبود تاب‌آوری پل‌ها در حوضه‌های مستعد سیلاب پیشنهاد می‌کند.

توسعه شکنندگی برای پل‌های قاب صلب تحت نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از سونامی (al et Qeshta, ۲۰۲۲) و ارزیابی آسیب‌پذیری پل‌های چوبی کم‌ارتفاع در برابر باد-موج-سیلاب ناشی از توفان (al et Ding, ۲۰۲۱) نمونه‌های دیگری از پژوهش‌های اخیر در این حوزه هستند.

۶. مواد و سیستم‌های نوین برای تاب‌آوری در برابر بارهای حدی

۶.۱. آلیاژهای حافظه‌دار و سیستم‌های خودمرکزگرا

پیشرفت‌های اخیر در علم مواد، فرصت‌های جدیدی برای افزایش تاب‌آوری سازه‌ها در برابر بارهای حدی فراهم کرده است. سارکیسیان (Sarkisian, ۲۰۲۵) در مرور خود بر سازه‌های تاب‌آور، از مواد تا سیستم‌ها، نشان می‌دهد که مواد با مقاومت متوسط، هنگامی که به صورت خلاقانه مونتاژ شوند، می‌توانند مقاومت قابل توجهی در برابر بارها فراهم کنند. اجزای سازه‌ای که برای حداکثر عمر و عملکرد طراحی شده‌اند، می‌توانند سازه‌های شکننده را به سازه‌هایی با شکل‌پذیری تبدیل کنند که در آن آسیب در مواجهه با بارهای حدی کاهش می‌یابد.

آلیاژهای حافظه‌دار (SMA) یکی از نوآورانه‌ترین مواد مورد استفاده در این زمینه هستند. مرکز مهندسی بکتل دانشگاه UC Berkeley اولین ساختمانی است که از آلیاژ حافظه‌دار به عنوان فیوز لرزه‌ای برای اتلاف انرژی و محافظت از مهاربندی کششی در برابر حرکات شدید زمین استفاده می‌کند (Sarkisian, ۲۰۲۵). این سیستم، ضمن حفظ ایمنی جانی، عملکرد بالایی را ارائه می‌دهد و وقفه کسب‌وکار و کرین نهفته مورد نیاز برای تعمیر یا جایگزینی عناصر سازه‌ای را به حداقل می‌رساند.

۶.۲. میراگرهای اصطکاکی و سیستم‌های فیوز

معرفی دستگاه‌های اصطکاکی در روسازه‌ها به عنوان یک روش مؤثر برای اتلاف انرژی در طول رویدادهای لرزه‌ای، در حالی که از ساختمان پایه در برابر آسیب محافظت می‌کنند، تثبیت شده است. سارکیسیان (Sarkisian, ۲۰۲۵) نمونه‌هایی از کاربرد این سیستم‌ها را ارائه می‌دهد، از جمله برج SANY که از سیستم مهاربندی جانبی با لنگرهای افقی متشکل از فیوزهای اصطکاکی استفاده می‌کند که در یک رویداد لرزه‌ای بزرگ به صورت ارتجاعی عمل می‌کنند.

سیستم‌های خودمرکزگرا که پس از رویدادهای حدی به حالت اولیه بازمی‌گردند، یکی دیگر از پیشرفت‌های مهم در طراحی تاب‌آور هستند. روش طراحی مبتنی بر عملکرد برای قاب‌های فولادی مهاربندی شده با میراگر ویسکوز خودمرکزگرا مبتنی بر فنر دیسکی، نمونه‌ای از این رویکرد است (Method, Design Seismic Performance-Based, ۲۰۲۴). این سیستم‌ها با ترکیب اتلاف انرژی و بازگشت به مرکز، آسیب سازه‌ای را کاهش داده و زمان بازگشت به بهره‌برداری را کوتاه می‌کنند.

۶.۳. چوب سازه‌ای و سیستم‌های ترکیبی

چوب به‌عنوان یک مصالح سازه‌ای تجدیدپذیر و کم‌کربن، در دهه اخیر توجه فزاینده‌ای را به‌عنوان جایگزین پایدار برای مصالح سنتی جلب کرده است. سیستم‌های ترکیبی چوب-فولاد و چوب-بتن، که مزایای هر دو مصالح را ترکیب می‌کنند، در حال ظهور به‌عنوان راه‌حل‌های تاب‌آور و پایدار هستند.

طراحی باد ساختمان‌های بلند چوبی، یکی از زمینه‌های فعال پژوهش است. اسسیومن‌تا و همکاران (al et Sciomenta, ۲۰۲۵) ملاحظات طراحی باد برای ساختمان‌های بلند چوبی را بررسی کرده‌اند. همچنین، ارزیابی عملکرد باد ساختمان‌های بلند چوبی خودمركزگرا تحت بارهای باد ریزش‌باد شبیه‌سازی‌شده، کاربرد سیستم‌های چوبی نوآورانه را در شرایط بار حدی نشان می‌دهد.

طراحی چندخطری ساختمان‌های بلند فولادی-چوبی کم‌آسیب تحت بارهای باد و زلزله، یکی دیگر از رویکردهای یکپارچه است که پتانسیل سیستم‌های ترکیبی را در مواجهه با مخاطرات چندگانه نشان می‌دهد (of design Multi-hazard buildings, steel-timber high-rise low-damage, ۲۰۲۴).

۶.۴. مصالح و سیستم‌های تطبیقی

مفهوم سازه‌های تطبیقی—که می‌توانند با تغییر شرایط بارگذاری یا محیطی، رفتار خود را تنظیم کنند—در حال ظهور به‌عنوان یک پارادایم نوین در طراحی تاب‌آور است. ماژول‌های مسکن دوزیست، که برای انطباق با هر دو شرایط خشکی و آبی طراحی شده‌اند، نمونه‌ای از این رویکرد تطبیقی است. فیزیولی و همکاران (al et Fiesoli, ۲۰۲۵) این ماژول‌ها را به‌عنوان راه‌حل‌های پایدار nZEB برای انطباق اقلیمی معرفی می‌کنند که از زیست‌مواد پیشرفته و فناوری‌های اینترنت اشیا برای دستیابی به استاندارد ساختمان تقریباً صفر انرژی استفاده می‌کنند.

این ماژول‌ها نه فقط برای مقاومت در برابر رویدادهای آب‌وهوایی حدی، بلکه برای تطبیق فعال با شرایط در حال تغییر طراحی شده‌اند. این رویکرد، الگویی برای آینده معماری است که انطباق‌پذیری، پایداری و نوآوری فناورانه را برای رفع نیازهای مسکن امروز و فردا ترکیب می‌کند (al et Fiesoli, ۲۰۲۵).

۷. چارچوب یکپارچه پیشنهادی برای طراحی تاب‌آور اقلیمی

بر اساس مرور نظام‌مند ادبیات، این بخش یک چارچوب یکپارچه برای طراحی و ارزیابی سازه‌های تاب‌آور اقلیمی در برابر بارهای حدی پیشنهاد می‌کند. این چارچوب، پنج مؤلفه اصلی را در بر می‌گیرد:

مؤلفه نخست: تعریف اهداف عملکردی چندمعیاره. برخلاف طراحی سنتی که صرفاً بر معیارهای مقاومتی متمرکز است، چارچوب پیشنهادی مستلزم تعریف اهداف عملکردی صریح در چهار حوزه است: ایمنی جانی، قابلیت استفاده پس از رویداد،

زمان بازگشت به بهره‌برداری، و پایداری زیست‌محیطی. این اهداف باید با مشارکت ذی‌نفعان و با در نظر گرفتن شرایط خاص هر پروژه تعریف شوند (Bianchi, ۲۰۲۳).

مؤلفه دوم: ارزیابی خطر چندخطری تحت عدم ایستایی اقلیمی. چارچوب پیشنهادی از رویکردهای احتمالاتی پیشرفته برای ارزیابی خطر چندخطری استفاده می‌کند که شامل مدل‌سازی تعاملات بین مخاطرات (مانند بارش-زلزله، باد-سیلاب) و در نظر گرفتن عدم ایستایی ناشی از تغییر اقلیم است. این مؤلفه از رویکرد الحمید و همکاران (۲۰۲۴a) برای طراحی LRFD تطبیقی و چارچوب چرخه عمر هی و همکاران (۲۰۲۵) الهام می‌گیرد.

مؤلفه سوم: تحلیل عملکرد سازه‌ای با ملاحظات عدم قطعیت. تحلیل سازه‌ای در این چارچوب، فراتر از تحلیل استاتیک معادل سنتی است و شامل تحلیل دینامیک غیرخطی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای انتشار عدم قطعیت‌ها، و ارزیابی شکنندگی برای سطوح مختلف شدت مخاطره است. اسپنس و آروناچالام (Arunachalam, & Spence, ۲۰۲۲) بر اهمیت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های معرفتی و تصادفی در تحلیل عملکرد تأکید می‌کنند.

مؤلفه چهارم: طراحی چندسطحی و تطبیقی. چارچوب پیشنهادی از رویکرد طراحی چندسطحی استفاده می‌کند که در آن، سطوح مختلف عملکردی برای سطوح مختلف مخاطره تعریف می‌شود. این رویکرد، امکان استفاده بهینه از منابع را فراهم می‌کند: برای رویدادهای با احتمال بالا، عملکرد کامل حفظ می‌شود؛ برای رویدادهای نادر و شدید، ایمنی جانی تضمین شده و آسیب قابل تعمیر پذیرفته می‌شود.

مؤلفه پنجم: ادغام پایداری و تاب‌آوری. چارچوب پیشنهادی، پایداری زیست‌محیطی را به‌عنوان یک هدف عملکردی درجه اول در فرآیند طراحی ادغام می‌کند. این ادغام شامل ارزیابی چرخه عمر، محاسبه کربن نهفته و عملیاتی، و انتخاب مصالح و سیستم‌هایی است که هم تاب‌آوری و هم پایداری را maximized می‌کنند. بیانچی (Bianchi, ۲۰۲۳) نشان می‌دهد که راه‌حل‌های یکپارچه تاب‌آوری-پایداری می‌توانند منجر به کاهش قابل توجه اتلاف تاب‌آوری و تخصیص کارآمدتر منابع شوند.

۸. بحث و نتیجه‌گیری

۸.۱. جمع‌بندی یافته‌ها

این مقاله به بررسی رویکردهای نوین در طراحی سازه‌های تاب‌آور اقلیمی و مهندسی مبتنی بر عملکرد در برابر بارهای حدی پرداخت. یافته‌های کلیدی پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

نخست، پارادایم سنتی طراحی تجویزی، که بر فرض ایستایی بارهای اقلیمی و داده‌های تاریخی استوار است، در شرایط تغییر اقلیم معاصر به‌طور فزاینده‌ای ناکارآمد می‌شود. غصن و دِوینینی (Devineni, & Ghosn, ۲۰۲۵) و اسپنس و آروناچالام

(Arunachalam, & Spence ۲۰۲۲) به‌طور مستدل نشان می‌دهند که رویکردهای تجویزی قادر به تأمین عملکرد قابل قبول سازه در طول رویدادهای حدی نیستند و منجر به تخمین نادرست ریسک می‌شوند.

دوم، مهندسی مبتنی بر عملکرد باد (PBWE) به‌عنوان حوزه‌ای در حال بلوغ، چارچوبی را فراهم می‌کند که در آن، عملکرد ساختمان در طول رویدادهای باد حدی به‌طور صریح ارزیابی می‌شود. این حوزه از الگوی مهندسی مبتنی بر عملکرد لرزه‌ای الهام گرفته و در حال توسعه روش‌های اختصاصی خود است. ادغام روش‌های بهینه‌سازی و ابزارهای طراحی کمک‌شده با پایگاه داده مانند DAD_PBD، پتانسیل قابل توجهی برای بهبود فرآیند طراحی دارد (NIST, ۲۰۲۴).

سوم، طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان در شرایط عدم اطمینانی اقلیمی، مستلزم رویکردهای نوینی است که فراتر از آمار ایستاد حرکت می‌کنند. روش LRFD تطبیقی (al et Alhamid, ۲۰۲۴a) و چارچوب‌های چرخه عمر احتمالاتی (al et He, ۲۰۲۵) نمونه‌هایی از این رویکردها هستند که امکان حفظ شاخص قابلیت اطمینان هدف در شرایط متغیر اقلیمی را فراهم می‌کنند.

چهارم، رویکردهای چندخطری و یکپارچه، ضرورتی انکارناپذیر برای مواجهه با پیچیدگی‌های مخاطرات اقلیمی ترکیبی هستند. چارچوب‌هایی مانند RAMSSHEEP و رویکردهای یکپارچه لرزه‌ای-اقلیمی، امکان در نظر گرفتن تعاملات بین مخاطرات را فراهم می‌کنند (al et Fernandes, ۲۰۲۶; Bianchi, ۲۰۲۳).

پنجم، مواد و سیستم‌های نوین از جمله آلیاژهای حافظه‌دار، میراگرهای اصطکاکی، سیستم‌های خودمركزگرا، و مصالح تطبیقی، پتانسیل قابل توجهی برای کاهش آسیب و افزایش تاب‌آوری در برابر بارهای حدی دارند (Sarkisian, ۲۰۲۵; et Fiesoli, al, ۲۰۲۵).

۸.۲. محدودیت‌ها و جهت‌گیری‌های آینده

این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است که باید در تفسیر یافته‌ها مدنظر قرار گیرد. نخست، با وجود مرور جامع ادبیات، تمرکز اصلی بر روی سه حوزه بارگذاری (باد، سیلاب، زلزله) بوده است و سایر بارهای اقلیمی مانند بار برف، یخ‌زدگی، و امواج گرمایی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. دوم، بسیاری از مطالعات مورد بررسی بر روی ساختمان‌ها و پل‌ها متمرکز بوده‌اند و سایر انواع زیرساخت‌ها مانند شبکه‌های برق، خطوط لوله، و تأسیسات آب و فاضلاب کمتر بررسی شده‌اند.

برای پژوهش‌های آینده، چند جهت‌گیری کلیدی پیشنهاد می‌شود. نخست، توسعه چارچوب‌های طراحی چندخطری که همزمان چندین بار اقلیمی و لرزه‌ای را در نظر بگیرند، ضروری است. دوم، ادغام داده‌های اقلیمی با وضوح بالا و پیش‌بینی‌های منطقه‌ای در فرآیند طراحی سازه، نیازمند همکاری بین‌رشته‌ای بین مهندسان سازه، اقلیم‌شناسان و متخصصان آمار است. سوم، توسعه مواد و سیستم‌های تطبیقی که می‌توانند با شرایط اقلیمی در حال تغییر انطباق یابند، یکی از اولویت‌های پژوهش در سال‌های آینده است.

۸.۳. نتیجه‌گیری نهایی

تغییر اقلیم، مهندسی سازه را با یکی از بنیادین‌ترین چالش‌های تاریخ خود مواجه کرده است: چگونه می‌توان سازه‌هایی طراحی کرد که نه فقط در برابر بارهای حدی کنونی مقاوم باشند، بلکه با شرایط اقلیمی در حال تغییر نیز انطباق یابند؟ پاسخ به این سؤال، مستلزم گذار از پارادایم تجویزی سنتی به پارادایم مهندسی مبتنی بر عملکرد تاب‌آور است که در آن، اهداف عملکردی چندمعیاره، ارزیابی خطر چندخطری تحت عدم ایستایی، و ادغام پایداری زیست‌محیطی، به‌عنوان ستون‌های اصلی فرآیند طراحی شناخته می‌شوند.

چارچوب یکپارچه پیشنهادی در این مقاله، گامی در جهت تحقق این پارادایم نوین است. با این حال، تحقق کامل آن مستلزم همکاری بین‌رشته‌ای گسترده، توسعه ابزارهای تحلیلی پیشرفته، و بازنگری در آیین‌نامه‌های طراحی فعلی است. آیین‌نامه‌های نسل دوم یوروکد که اقدامات انطباق اقلیمی را معرفی کرده‌اند (ISO ۲۰۲۴:۴۹۳۱-۱ ISO, ۲۰۲۴) نمونه‌هایی از این بازنگری هستند، اما گام‌های بیشتری برای همگام‌سازی آیین‌نامه‌های طراحی با واقعیت‌های اقلیمی در حال تغییر مورد نیاز است.

در نهایت، تاب‌آوری اقلیمی سازه‌ها نه فقط یک چالش فنی، بلکه یک ضرورت اجتماعی و اقتصادی است. جوامعی که در آن‌ها زیرساخت‌های حیاتی در برابر بارهای حدی مقاوم و تاب‌آور هستند، نه فقط از نظر ایمنی جانی و مالی، بلکه از نظر توانایی بازگشت سریع به فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی نیز مزیت قابل توجهی خواهند داشت. مهندسی سازه در عصر تغییر اقلیم، مسئولیتی مضاعف در قبال نسل‌های آینده بر دوش دارد.

منابع

- Bianchi, S). ۲۰۲۳. (Integrating resilience in the multi-hazard sustainable design of buildings .Disaster Prevention and Resilience, *۲*)
<https://doi.org/10.20517/dpr.2023.16>
- Bianchi, S., Ciurlanti, J., Overend, M., & Pampanin, S). ۲۰۲۲. (A multi-criteria decision support framework for designing seismic and thermal resilient facades . Engineering Structures, *۲۵۲*
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113672>
- Bilionis, D. V., Vlachakis, K., Vamvatsikos, D., Dasiou, M.-E., Vayas, I., & Lagouvardos, K). ۲۰۲۲. (Risk assessment of rehabilitation strategies for steel lattice telecommunication towers of Greece under extreme wind hazard .Engineering Structures, *۲۶۲*, ۱۱۴۶۲۵
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114625>
- Climate change implications in the second generation of structural Eurocodes .)۲۰۲۶. (Taylor & Francis.

- Comparative study on temperature actions in structural design codes) .۲۰۲۶. (ScienceDirect.
- Ding, Z., Zhang, W., Hughes, W., & Zhu, D) .۲۰۲۱. (A modified sub-assembly approach for hurricane induced wind-surge-wave vulnerability assessment of low-rise wood buildings in coastal communities .Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, *۲۱۵*, ۱۰۴۶۸۷ .
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104687>
- Fiesoli, I., Pontillo, G., & Lotti, G) .۲۰۲۰. (Amphibious housing modules :Sustainable nZEB solutions for climate adaptation .PAD, *۱۸*)۱(, ۱۷۳-۱۹۰.
- Franchini, M., & Galasso, C) .۲۰۲۳. (Multi-hazard design frameworks combined with life-cycle analysis .In Proceedings of the SECED Conference.
- Ghosn, M., & Devineni, N) .۲۰۲۰. (Reliability-based design criteria for structures and civil infrastructure subjected to extreme events in a changing climate . Presented at the ۲۷th International Conference on Structural Safety and Reliability, August ۲۷-۲۹, ۲۰۲۰.
- Gonzalez-Duenas, C., & Padgett, J .E) .۲۰۲۱. (Performance-based coastal engineering framework .Frontiers in Built Environment, *۷* .
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.69003>
- Gonzalez-Duenas, C., et al) .۲۰۲۳. (Resilience frameworks considering climate change impacts and cascading effects .Journal of Infrastructure Systems, *۲۹*)۴(.
- He, X., et al) .۲۰۲۴. (Procedure for estimating the life-cycle landslide probability under nonstationary rainfall hazard due to climate change .Structure and Infrastructure Engineering, *۲۰*)۶(, ۱-۱۸ .
<https://doi.org/10.1080/10732479.2020.2024819>
- He, X., et al) .۲۰۲۰. (Probabilistic life-cycle framework for combined rainfall and seismic hazards .Structure and Infrastructure Engineering, *۲۱*)۷(, ۱-۲۰ .
<https://doi.org/10.1080/10732479.2020.2024819>
- Iannacone, L., et al) .۲۰۲۳. (Multi-hazard resilience of critical infrastructure . Reliability Engineering & System Safety, *۲۳۷*, ۱۰۹۳۸۲.
- ISO) .۲۰۲۴. (ISO ۴۹۳۱-۱:۲۰۲۴ — Buildings and civil engineering works — Principles, framework and guidance for resilience design — Part ۱ :Adaptation to climate change .International Organization for Standardization.
- Kenéz, Á., & Joó, A .L) .۲۰۲۴. (Performance-based wind engineering assessment of a telecommunication mast utilizing Bayesian extreme wind velocity model . Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, *۳۸*)۵(, ۱-۱۸.
- Multi-hazard design of low-damage high-rise steel-timber buildings subjected to wind and earthquake loading) .۲۰۲۴. (Bulletin of Earthquake Engineering.

- NIST) .۲۰۲۴ .(Database-assisted design :Performance-based approach for dynamically sensitive steel and reinforced concrete structures) DAD_PBD Version ۲.۰ .(National Institute of Standards and Technology.
- Performance-based seismic design method for disc spring-based self-centering viscous dissipative braced steel frame) .۲۰۲۴ .(Journal of Building Engineering, *۸۲*, ۱۰۸۲۳۴ .<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108234>
- Performance-based wind assessment of tall self-centering mass-timber buildings under simulated downburst winds) .۲۰۲۶ .(Journal of Structural Engineering, *۱۵۲*)۳.(
- Performance-based wind design of tall buildings considering corner modification and inelastic behavior) .۲۰۲۴ .(Journal of Structural Engineering, *۱۵۰*)۷.(
- Qeshta, I .M .I., Hashemi, M .J., Hashemi, M .R., Gravina, R .J., & Setunge, S) .۲۰۲۲ .(Development of fragility functions for rigid-frame bridges subjected to tsunami-induced hydrodynamic forces .Structure and Infrastructure Engineering, *۱۸*)۱۰-۱۱(, ۱۴۱۰-۱۴۲۷ .<https://doi.org/10.1080/10732479.2021.1897148>
- Rahman, J., Aghaeidoost, V., & Billah, A .H .M .M) .۲۰۲۴ .(Resilience of coastal bridges under extreme wave-induced loads .Resilient Cities and Structures, *۳*)۲(, ۸۵-۱۰۰ .<https://doi.org/10.1016/j.rcns.2024.07.002>
- Rethinking the guidelines for resilient river-crossing bridges :Insights from the ۲۰۲۴ Valencia flood) .۲۰۲۶ .(Structure and Infrastructure Engineering.
- Sarkisian, M .P) .۲۰۲۰ .(Resilient structures :Materials, components, systems .Structure & Infrastructure Engineering, *۲۱*)۷-۸(, ۱۱۷۳-۱۱۹۲ .<https://doi.org/10.1080/10732479.2020.2474714>
- Sciomenta, M., Tulebekova, S., & Stamatopoulos, H) .۲۰۲۰ .(Wind design for tall timber buildings .In Holistic Design of Taller Timber Buildings) pp ۱۰۴-۱۱۴ .(Springer.
- Spence, S .M .J., & Arunachalam, S) .۲۰۲۲ .(Performance-based wind engineering : Background and state of the art .Frontiers in Built Environment, *۸*, ۸۳۰۲۰۷ .<https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.830207>
- Wu, T., & Snaiki, R) .۲۰۲۰ .(Impact of climate change on extreme windstorms and implications for structural design in the United States .ASCE Journal of Structural Engineering, *۱۵۱*)۸(, ۰۳۱۲۰۰۰۳.
- Yuksel, Y) .۲۰۲۰ .(Global climate change and resilient coastal structures .In Coastal Disasters) Vol .۳ .(Elsevier.