ارزیابی روابط دستک قطری معادل موجود برای میان‌قاب‌های مصالح بنایی به منظور مدل سازی میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی

سجاد باقری[۱]، مهدی یزدانی[۲*]، سید جعفر هاشمی[۳]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، sajjadb1381@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-yazdani@araku.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، j-hashemi@araku.ac.ir

چکیده

با انتشار ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ و ارائه ضوابط مدون برای مدل‌سازی میان‌قاب‌های مصالح بنایی بر پایه مدل دستک قطری معادل، ارزیابی قابلیت تعمیم این رویکرد به سیستم‌های نوین، از جمله دیوارهای پانل ساندویچی بتنی، اهمیت ویژه‌ای یافته است. در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی اجزای محدود و با بهره‌گیری از رویکرد حل مسئله معکوس مبتنی بر هم‌ارزی سختی جانبی اولیه، عرض مؤثر دستک قطری معادل برای ۳۲ نمونه میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی محصور در قاب فولادی استخراج شد. سپس، رابطه مورد پذیرش در ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ به همراه ده رابطه متداول دیگر برای تعیین عرض مؤثر دستک قطری معادل، از طریق تحلیل آماری مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اگرچه رابطه پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ در مقایسه با سایر روابط موجود، عملکرد مناسب‌تری در برآورد سختی جانبی اولیه دیوارهای پانل ساندویچی بتنی دارد، اما همچنان با خطای قابل توجهی همراه است. ازاین‌رو، به‌منظور بهبود دقت پیش‌بینی، روابط مذکور با اعمال ضرایب اصلاحی ثابت مجدداً ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که رابطه دورانی و لو پس از اعمال ضریب اصلاحی ثابت ۰/۷۳۸، با میانگین قدر مطلق خطا و بیشینه خطای مطلق به‌ترتیب برابر با ۱۴ و ۵۵ درصد، بالاترین دقت پیش‌بینی را در میان روابط اصلاح‌شده برای پایگاه داده مورد مطالعه نشان داد؛ با این حال، خطاهای باقی‌مانده بیانگر ضرورت توسعه روابط اختصاصی برای میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی است.

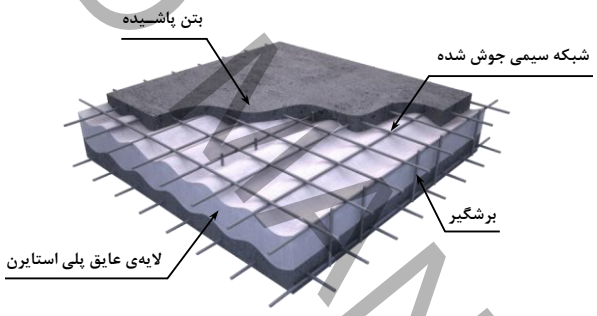
کلمات کلیدی

میان‌قاب، دستک قطری معادل، پانل ساندویچی بتنی، تحلیل آماری، مسئله معکوس.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، مفهوم توسعه پایدار به‌عنوان یکی از محورهای اصلی در برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های مهندسی مطرح شده است. در این چارچوب، مهندسی عمران نقشی کلیدی در کاهش مصرف منابع طبیعی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و محدود کردن اثرات زیست‌محیطی ساخت‌وساز ایفا می‌کند. انتخاب مصالح و سیستم‌های ساختمانی که ضمن تأمین الزامات سازه‌ای، منجر به کاهش هدررفت منابع و افزایش بهره‌وری انرژی شوند، یکی از راهبردهای اساسی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار به شمار می‌رود. در این میان، استفاده از سیستم‌های نوین میان‌قاب که با رویکرد صنعتی‌سازی و بهینه‌سازی مصرف مصالح توسعه یافته‌اند، توجه پژوهشگران و مهندسان را به خود جلب کرده است. در این راستا در سال‌های اخیر، با گسترش فناوری‌های جدید در صنعت ساختمان، به تدریج مصالح جدیدتری مانند پانل‌های ساندویچی بتنی معرفی شدند. مطابق شکل ۱ میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی از یک لایه مغزه پلی‌استایرن تشکیل شده‌اند که در دو طرف آن شبکه‌های توری فولادی قرار دارد و لایه‌های بتن پاششی بر روی این شبکه‌ها در محل ساخت اجرا می‌شود. این نوع از دیوارها به دلیل ماهیت پیش‌ساخته و فرآیند تولید کنترل‌شده خود، امکان کاهش قابل‌توجه دورریز مواد ساختمانی را فراهم می‌کنند و سبب می‌شود این سیستم‌ها در مقایسه با میان‌قاب‌های بنایی متداول هم‌راستایی بیشتری با اصول توسعه پایدار داشته باشند. افزون بر این، وجود لایه عایق پلی‌استایرن در پانل‌های ساندویچی بتنی موجب بهبود هم‌زمان عملکرد حرارتی و صوتی آن‌ها شده و با کاهش انتقال حرارت و صدا از جداره‌ها، به کاهش مصرف انرژی و ارتقای آسایش ساکنان در دوره بهره‌برداری ساختمان کمک می‌کند. مجموعه این مزایا، در کنار ویژگی‌های فنی و اجرایی نظیر سختی بیشتر، کیفیت ساخت یکنواخت و سرعت اجرای بالاتر، سبب شده است که استفاده از میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی در سال‌های اخیر مورد توجه روزافزون در ساختمان‌ها قرار گیرد [۱-۳]؛ با این حال، این سیستم‌ها در مقایسه با میان‌قاب‌های مصالح بنایی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.



شکل ۱: اجزای تشکیل دهنده‌ی پانل ساندویچی بتنی
Figure 1. Components of the concrete sandwich panel

پژوهش‌های اولیه بر رفتار مستقل پانل‌های ساندویچی بتنی متمرکز بوده است. فم و همکاران با مطالعات تجربی و تحلیلی نشان دادند که نوع و سختی رابط‌های برشی نقش مهمی در انتقال نیرو و ظرفیت باربری دارد [۴]. همچنین فرانکل و همکاران با بررسی پانل‌های مجهز به شبکه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف‌های کامپوزیتی نشان دادند که طراحی مناسب سیستم اتصال می‌تواند منجر به رفتار تقریباً یکپارچه بین لایه‌ها شود [۵]. با گسترش کاربرد پانل‌های ساندویچی در ساختمان‌ها، پژوهش‌ها به بررسی نقش این پانل‌ها در تعامل با قاب‌های سازه‌ای پرداختند. در این زمینه، هاشمی و همکاران با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی، رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی دارای میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی تحت بارهای چرخه‌ای را بررسی کردند و سختی جانبی اولیه، مقاومت جانبی، شکل‌پذیری، میزان اتلاف انرژی و نسبت میرایی ویسکوز معادل را در حالت‌های مختلفی محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که میان‌قاب‌های پانل ساندویچی موجب افزایش قابل‌توجه همه این ویژگی‌ها در مقایسه با قاب خالی (بدون میان‌قاب) می‌شود [۱]. همچنین در یک مطالعه عددی هاشمی و همکاران تاثیرات مشخصات هندسی و مکانیکی پانل‌ها را بر پاسخ جانبی سیستم بررسی کردند [۶]. در مطالعه‌ای دیگر رنجبر و همکاران رابطه‌ای به منظور محاسبه دوره تناوبی قاب‌های فولادی دارای میان‌قاب پانل‌های ساندویچی بتنی یک رابطه پیشنهاد دادند [۷]. امیدوار و همکاران با مقایسه قاب‌های فولادی دارای میان‌قاب‌های مختلف نشان دادند که میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی از نظر سختی جانبی و مقاومت نهایی عملکرد بهتری نسبت به سایر دیوارهای بنایی دارند؛

ACCEPTED MANUSCRIPT

به‌طوری‌که سختی اولیه این سیستم به‌ترتیب ۱/۹۰ و ۲/۹۵ برابر و حداکثر مقاومت جانبی آن ۱/۴۸ و ۱/۸۰ برابر قاب‌های دارای میان‌قاب آجر فشاری و بلوک بنایی اتوکلاو گزارش شده است. این نتایج بیانگر آن است که اثر این میان‌قاب‌ها می‌تواند در پاسخ لرزه‌ای سازه قابل‌توجه بوده و در بسیاری از موارد چشم‌پوشی از آن در تحلیل و طراحی لرزه‌ای قابل توجیه نباشد [۸]. در ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ (پیوست ۵) به اثر میان‌قاب‌های مصالح بنایی در تحلیل و طراحی لرزه‌ای سازه‌ها اشاره شده است و ضوابط مربوط به مدل‌سازی و لحاظ اثر این اعضا در طراحی لرزه‌ای به‌صورت مدون ارائه شده است [۹]. با وجود کاربرد گسترده مدل‌های دستک قطری معادل برای شبیه‌سازی اثر میان‌قاب‌های مصالح بنایی در تحلیل سازه‌ها، تعمیم مستقیم این روابط به میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی، به دلیل تفاوت‌های اساسی در ساختار لایه‌ای، رفتار مرکب مصالح و تفاوت چشمگیر در سختی جانبی [۸] با عدم قطعیت همراه است. با این حال، مدل دستک قطری معادل با هدف بازنمایی پاسخ کلی سیستم توسعه یافته و لزوماً به یک مکانیزم شکست خاص وابسته نیست. از سوی دیگر، با توجه به پذیرش رابطه مینستون ۱۹۷۴ در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش پنجم برای مدل‌سازی میان‌قاب‌های بنایی، ممکن است این رابطه در عمل برای سایر انواع میان‌قاب‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرند؛ ازاین‌رو، ارزیابی دقت این رابطه و تعیین دامنه کاربرد آن برای سایر انواع میان‌قاب ضروری به نظر می‌رسد. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه رفتار سازه‌ای میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته، اما ارزیابی دقیق روابط موجود دستک قطری برای این نوع میان‌قاب‌ها و کالیبراسیون آن‌ها بر اساس رفتار واقعی سیستم، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی دقت روابط متداول دستک قطری ارائه‌شده برای میان‌قاب‌های بنایی در پیش‌بینی سختی جانبی میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی و ارائه ضرایب اصلاحی مناسب به‌منظور بهبود انطباق این روابط با رفتار واقعی این سیستم‌ها است.

۲- مرور روابط دستک قطری معادل

یکی از چالش‌های مهم در طراحی سازه‌ها، استفاده بهینه از ظرفیت تمام مقاطع مورد استفاده در سازه است. در تحلیل و طراحی سازه‌های ساختمانی، دیوارهای میان‌قاب به طور عمومی اجزای غیرسازه‌ای تلقی می‌شوند. بنابراین، اثرات ناشی از دیوارها به صورت غیرمستقیم و با اعمال نیروی وزن معادل آن‌ها خلاصه می‌شود و اثرات هندسی و مکانیکی آن‌ها در رفتار کلی ساختمان دیده نمی‌شود. درصورتی‌که دیوارهای میان‌قاب در هنگام وقوع زلزله، با قاب پیرامونی خود درگیر شده و موجب کاهش جابجایی و افزایش سختی جانبی سازه می‌شوند. این افزایش سختی می‌تواند با کاهش قابل‌توجه دوره تناوب طبیعی سیستم سازه‌ای و متعاقباً به تغییر در تقاضای لرزه‌ای منجر شود [۱۰]. از این‌رو، مدل‌سازی میان‌قاب، افزون بر افزایش دقت پیش‌بینی رفتار سازه، امکان بهره‌برداری بهینه از ظرفیت مقاطع سازه‌ای را فراهم می‌کند و از این‌رومی‌تواند به بهینه شدن طراحی اجزای سازه و بهبود کارایی اقتصادی طرح شود؛ امری که در راستای تحقق اصول توسعه پایدار در طراحی سازه‌ها قرار دارد. به‌دلیل محدودیت‌های زمانی و پیچیدگی مدل‌سازی دقیق دیوارهای میان‌قاب به روش اجزای محدود، استفاده از رویکرد درشت مدل‌سازی[1]، یکی از اصلی‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی این دیوارها بر اساس روش دستک قطری معادل است. پارامتر اصلی دستک قطری معادل، عرض موثر آن است که تاثیر سختی جانبی و مقاومت نهایی دیوار میان‌قاب را لحاظ می‌کند. بر اساس همین ایده، در سال ۱۹۶۱ هولمز رابطه‌ای پیشنهاد کرد که طبق آن می‌توان اثر دیوار میان‌قاب مصالح بنایی محصور در قاب فولادی را معادل با یک مهاربند قطری در نظر گرفت. او در مدل خود، دیوار میان‌قاب را با یک دستک قطری مفصلی معادل‌سازی کرد که از همان جنس و ضخامت دیوار میان‌قاب ساخته شده بود، و عرض موثر آن نیز به صورت تقریبی طبق رابطه (۱) پیشنهاد شد [۱۱].

$$\frac{W}{d}=\frac{1}{3} \qquad (۱)$$

که در آن W عرض موثر دستک قطری معادل و d قطر دیوار میان‌قاب است. یک سال بعد یعنی در سال ۱۹۶۲ اسمیث با تکیه بر داده‌های تجربی حاصل از مجموعه‌ای کلان از نتایج آزمایشگاهی بر روی قاب‌های فولادی دارای میان‌قاب مصالح بنایی، حاصل این نسبت را به صورت تقریبی $۰/۰ \le W/d \le ۱/۲۵$ پیشنهاد کرد [۱۲]. در ادامه اسمیث و همکارانش در سال‌های ۱۹۶۶ و ۱۹۶۷ به مطالعه

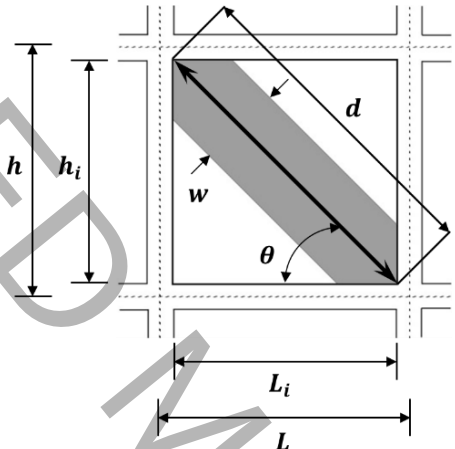
[1] Macro modeling

ACCEPTED MANUSCRIPT

آزمایشگاهی رفتار دیوارهای میان‌قاب مصالح بنایی محصور در قاب فولادی در برابر بارهای جانبی پرداختند [۱۳, ۱۴]، که با استفاده از نتایج این پژوهش‌ها توانستند در سال ۱۹۶۹ عرض دستک قطری معادل را با استفاده از طول ناحیه‌ی تماس بین قاب و میان‌قاب و بر پایه‌ی یک رابطه‌ی تحلیلی محاسبه کنند [۱۵]. این رابطه با الهام از رابطه‌ی طول تماس تیر آزاد روی بستر الاستیک تحت بار متمرکز که نخستین بار توسط هتنی ارائه شده بود، استخراج شد [۱۶]. آنها عرض موثر دستک قطری معادل را تابعی از پارامتر بدون بعد λ که حاصل نسبت سختی میان‌قاب به قاب است، پیشنهاد دادند (رابطه۲). نمای کلی سیستم قاب دارای میان‌قاب که پارامتر λ برای آن ارائه شده بود، در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_i.t_i.\sin 2\theta}{4E_f.I_c.h_i}} \qquad (۲)$$

که در آن θ زاویه ای است که از رابطه $\theta = \tan^{-1}(h_i/L_i)$ محاسبه می‌شود؛ E_i مدول الاستیسیته مصالح بنایی میان‌قاب، $E_f.I_c$ صلبیت خمشی ستون‌ها، t_i ضخامت پانل میان‌قاب، h_i ارتفاع پانل میان‌قاب، h ارتفاع ستون بین محور تیرها و L_i طول دهانه میان‌قاب است (شکل ۲).



شکل ۲. پارامترهای مربوط به رابطه دستک قطری معادل اسمیث و همکاران
Figure 2. Smith et al. equivalent diagonal strut parameters

مینستون در سال ۱۹۷۱ با استفاده از پارامتر بدون بعد اسمیث، رابطه‌ی (۳) را برای محاسبه عرض موثر دستک قطری معادل بر پایه اطلاعات تجربی و تحلیلی برای میان‌قاب‌های مصالح بنایی محصور در قاب فولادی پیشنهاد داد [۱۷].

$$\frac{W}{d} = 0.16(\lambda h)^{-0.3} \qquad (۳)$$

مینستون در سال ۱۹۷۴ با اصلاح ضرایب مدل پیشین، رابطه بازنگری‌شده‌ای برای تعیین عرض مؤثر دستک معادل ارائه کرد که انطباق بهتری با نتایج آزمایشگاهی داشت (رابطه ۴) [۱۸]. این رابطه به‌تدریج به پرکاربردترین روش برای محاسبه عرض مؤثر دستک قطری تبدیل شد و در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های معتبر، از جمله FEMA-274 [۱۹]، FEMA-306 [۲۰] و آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش پنجم) [۹]، نیز مورد پذیرش قرار گرفت.

$$\frac{W}{d} = 0.175(\lambda h)^{-0.4} \qquad (۴)$$

لیاوو و کوان در سال ۱۹۸۴ با تمرکز بر قاب‌های بتن مسلح، رابطه جدیدی برای عرض موثر دستک قطری معادل دیوارهای مصالح بنایی معرفی کردند که از توسعه و باز تعریف روابط مینستون حاصل شده بود (رابطه ۵). نوآوری این پژوهش بر لحاظ کردن رفتار غیرخطی دیوار (تا حدودی) بود. در این رابطه نتایج قابل قبول برای $۲۵ \le \theta \le ۵۰$ برحسب درجه تعریف شده است [۲۱].

$$\frac{W}{d} = \frac{0.95\sin 2\theta}{2\sqrt{(\lambda h)}} \qquad (۵)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

در سال ۱۹۸۷ دکانینی و فانتین برای قاب‌های فولادی و بتن مسلح دارای دیوار مصالح بنایی، دو رابطه (۶) و (۷) را به ترتیب برای حالت‌های دیوار بدون ترک و ترک خورده پیشنهاد کردند [۲۲].

$$\frac{W}{d}=\begin{Bmatrix}0.085+\dfrac{0.748}{(\lambda h)} & if \quad (\lambda h)\le 7.85\\ 0.130+\dfrac{0.393}{(\lambda h)} & if \quad (\lambda h)> 7.85\end{Bmatrix} \qquad (۶)$$

$$\frac{W}{d}=\begin{Bmatrix}0.010+\dfrac{0.707}{(\lambda h)} & if \quad (\lambda h)\le 7.85\\ 0.040+\dfrac{0.470}{(\lambda h)} & if \quad (\lambda h)> 7.85\end{Bmatrix} \qquad (۷)$$

دورانی و لو در سال۱۹۹۴، بر مبنای نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود و استفاده از دستاوردهای سایر پژوهش‌ها، رابطه‌ی (۸) را برای محاسبه عرض موثر دستک قطری معادل پیشنهاد داده‌اند [۲۳].

$$\frac{W}{d}=\gamma \sin 2\theta \qquad (۸)$$

که در آن پارامتر γ به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$\gamma = 0.32\sqrt{\sin 2\theta}\left(\frac{h^4.E_i.t_i}{m.E_c.I_c.h_i}\right)^{-0.1} \qquad (۹\text{- الف})$$

$$m = 6\left(1+\frac{6E_b.I_b.h}{\pi.E_c.I_c L}\right) \qquad (۹\text{- ب})$$

هندری در سال ۱۹۹۸ با تمرکز بر قاب‌های بتن مسلح و فولادی، رابطه‌ی (۹) را برای عرض موثر دستک قطری معادل میان‌قاب‌های مصالح بنایی ارائه کرد [۲۴].

$$W = 0.5\sqrt{\alpha_h^2+\alpha_L^2} \qquad (۱۰)$$

که در آن α_h و α_L به ترتیب طول تماس بین دیوار و ستون و تیر قبل از شکست اولیه دیوار هستند که مطابق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شوند.

$$\alpha_h = \frac{\pi}{2}\left(\frac{4E_c.I_c.h_i}{E_i.t_i.\sin 2\theta}\right)^{\frac{1}{4}} \qquad (۱۱\text{- الف})$$

$$\alpha_L = \pi\left(\frac{4E_c.I_b.L_i}{E_i.t_i.\sin 2\theta}\right)^{\frac{1}{4}} \qquad (۱۱\text{- ب})$$

پاپیا و همکاران در سال ۲۰۰۳ با بازنگری در پارامتر λ پیشنهادی اسمیث، علاوه بر ویژگی‌های مصالح میان‌قاب و قاب، اثرات هندسی سیستم سازه‌ای نظیر نسبت دهانه به ارتفاع و مساحت مقاطع تیر و ستون را نیز در نظر گرفته و پارامتر اصلاح‌شده‌ای تحت عنوان λ^* را مطابق رابطه (۱۲) پیشنهاد دادند که بیان‌گر نسبت واقعی‌تری از سختی قاب فولادی و میان‌قاب مصالح بنایی است [۲۵].

$$\lambda^* = \frac{E_i}{E_f}\frac{t_i.h'}{A_c}\left(\frac{h'^2}{L^2}+\frac{1}{4}\frac{A_c}{A_b}\frac{L}{h'}\right) \qquad (۱۲)$$

که در آن A_c و A_b سطح مقطع ستون و تیر و پارامترهای L و h' که به ترتیب طول دهانه قاب و ارتفاع قاب است (شکل ۳). آن‌ها با استفاده از پارامتر پیشنهادی خود و در نظر گرفتن تأثیر ضریب پواسون (ν_i) مصالح میان‌قاب بر تغییرشکل قطری دیوار، رابطه‌ای برای محاسبه‌ی عرض مؤثر دستک قطری معادل ارائه نمودند (رابطه ۱۳).

$$\frac{W}{d} = \frac{c}{z}\frac{1}{(\lambda^*)^\beta} \qquad (۱۳)$$

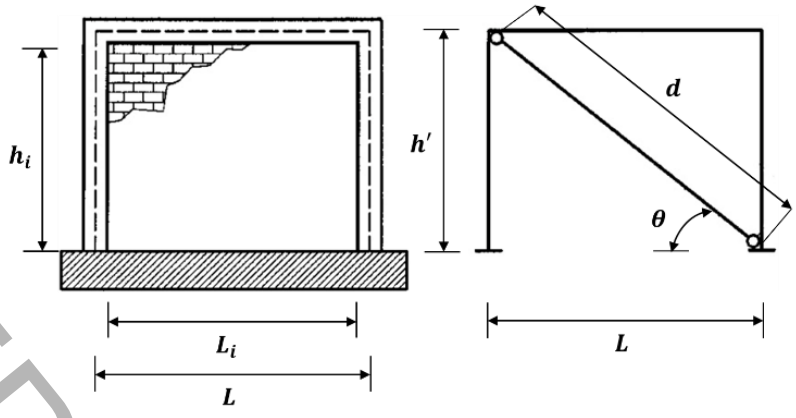
که در آن:

$$c = 0.249 - 0.0116\nu_i + 0.567\nu_i^2 \qquad (۱۴\text{- الف})$$

$$\beta = 0.146 + 0.0073\nu_i + 0.126\nu_i^2 \qquad (۱۴\text{- ب})$$

$$z = \begin{Bmatrix}1 & if \quad L_i/h_i = 1\\ 1.125 & if \quad L_i/h_i = 1.5\end{Bmatrix} \qquad (۱۴\text{- ج})$$

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۳. پارامترهای مربوط به رابطه دستک قطری معادل پاپیا و همکاران [۲۵]

Figure 3. Papia et al. equivalent diagonal strut parameters

درسال ۲۰۱۱ کریسوستومو و آستریس به صورت جامع مدل‌های مختلف دستک قطری معادل برای دیوارهای میان‌قاب را مرور کرده‌اند. آن‌ها نقاط ضعف مدل‌های پیشین را از جمله وابستگی زیاد به پارامترهای تجربی و نادیده‌گرفتن اثرات بازشوها و بارهای قائم بیان کردند [۲۶]، در ادامه آنها در سال ۲۰۱۲ ضرایب رابطه مینستون را به گونه‌ای تغییر دادند (رابطه ۱۵) که برای محدوده‌ی وسیع‌تری از قاب‌های بتنی یا فولادی (از قاب‌های بسیار صلب تا قاب‌های انعطاف‌پذیر) بتواند عرض موثر دستک قطری را محاسبه نماید [۲۷].

$$\frac{W}{d} = 0.270(\lambda h)^{-0.4} \qquad (۱۵)$$

کمپیون و همکاران در سال ۲۰۱۴ با هدف در نظر گرفتن تأثیر بارهای عمودی (F_v) وارد بر تیر فوقانی قاب‌های بتن مسلح دارای میان‌قاب مصالح بنایی، رابطه ارائه شده توسط پاپیا و همکاران را با استفاده از ضریب K اصلاح کردند. آن‌ها با استفاده از مدل اجزای محدود، اثر بارهای ثقلی وارد بر تیر فوقانی را بر رفتار جانبی دیوار میان‌قاب بررسی کردند، نتایج نشان داد که بارهای عمودی موجب افزایش سطح تماس بین قاب و میان‌قاب می‌شوند که این امر منجر به افزایش سختی و مقاومت سیستم در برابر بارهای جانبی می شود. در نهایت، آن‌ها رابطه‌ای برای تعیین عرض مؤثر دستک معادل مطابق رابطه (۱۶) ارائه کردند که تأثیر بارهای عمودی را در عرض موثر دستک قطری معادل در نظر می‌گیرد [۲۸]. لازم به ذکر است در صورت عدم وجود بار عمودی، نتایج رابطه کمپیون و همکاران مشابه رابطه پاپیا و همکاران خواهد بود.

$$\frac{W}{d} = K\frac{c}{(\lambda^*)^{\beta}} \qquad (۱۶)$$

که در آن پارامتر c و β مانند رابطه پاپیا و همکاران است (رابطه ۱۴) و پارامتر K به‌عنوان ضریب اصلاحی برای لحاظ‌کردن اثر بارهای ثقلی (ε_v) در رابطه، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K = \frac{1}{0.75 + 0.25\frac{L_i}{h_i}}\left(1 + (18\lambda^* + 200)\varepsilon_v\right) \qquad (۱۷\text{- الف})$$

$$\varepsilon_v = \frac{F_v}{2A_c E_c} \qquad (۱۷\text{- ب})$$

بررسی‌های مبتنی بر قابلیت اطمینان نشان داده‌اند که عملکرد روابط دستک قطری معادل به پارامتر پاسخ مورد ارزیابی وابسته است؛ به‌گونه‌ای که یک رابطه ممکن است در پیش‌بینی برخی پاسخ‌ها، نظیر مقاومت، عملکرد مناسبی داشته باشد، اما در برآورد سایر پاسخ‌ها، از جمله تغییرمکان نسبی، از دقت کمتری برخوردار باشد [۲۹]. این موضوع، بر ضرورت ارزیابی مستقل عملکرد این روابط برای هر یک از پارامترهای پاسخ تأکید دارد. همچنین، مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که شرایط اتصال میان‌قاب و قاب تأثیر قابل

ACCEPTED MANUSCRIPT

توجهی بر رفتار لرزه‌ای، یکپارچگی سیستم و پاسخ درون‌صفحه قاب‌های میان‌پر دارد [۳۰]. این یافته‌ها بیانگر آن است که جزئیات اتصال و نحوه اندرکنش قاب و میان‌قاب می‌توانند بر پاسخ سازه‌ای سیستم و در نتیجه بر پارامترهای مورد استفاده در کالیبراسیون روابط دستک قطری معادل تأثیرگذار باشند. ازاین‌رو، دقت و دامنه کاربرد هر رابطه تا حدی به شرایط اتصال و مشخصات پایگاه داده‌ای که رابطه بر اساس آن توسعه یافته است، وابسته بوده و ممکن است یک رابطه برای برخی شرایط اتصال عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر شرایط داشته باشد.

۳- مشخصات نمونه‌ها و مدل‌سازی

از آنجا که ارزیابی و اصلاح روابط تعیین عرض مؤثر دستک قطری معادل در این پژوهش بر پایه داده‌های استخراج‌شده از مطالعات مرجع انجام شده است، بررسی ویژگی‌های هندسی و مکانیکی نمونه‌های پایه، شرایط اتصال بین قاب و میان‌قاب و فرضیات به‌کاررفته در این پژوهش‌ها، برای تبیین مبانی تحلیل و دامنه اعتبار نتایج ضروری است. در ادامه، چارچوب و مشخصات مطالعات مرجع به‌طور خلاصه ارائه می‌شود.

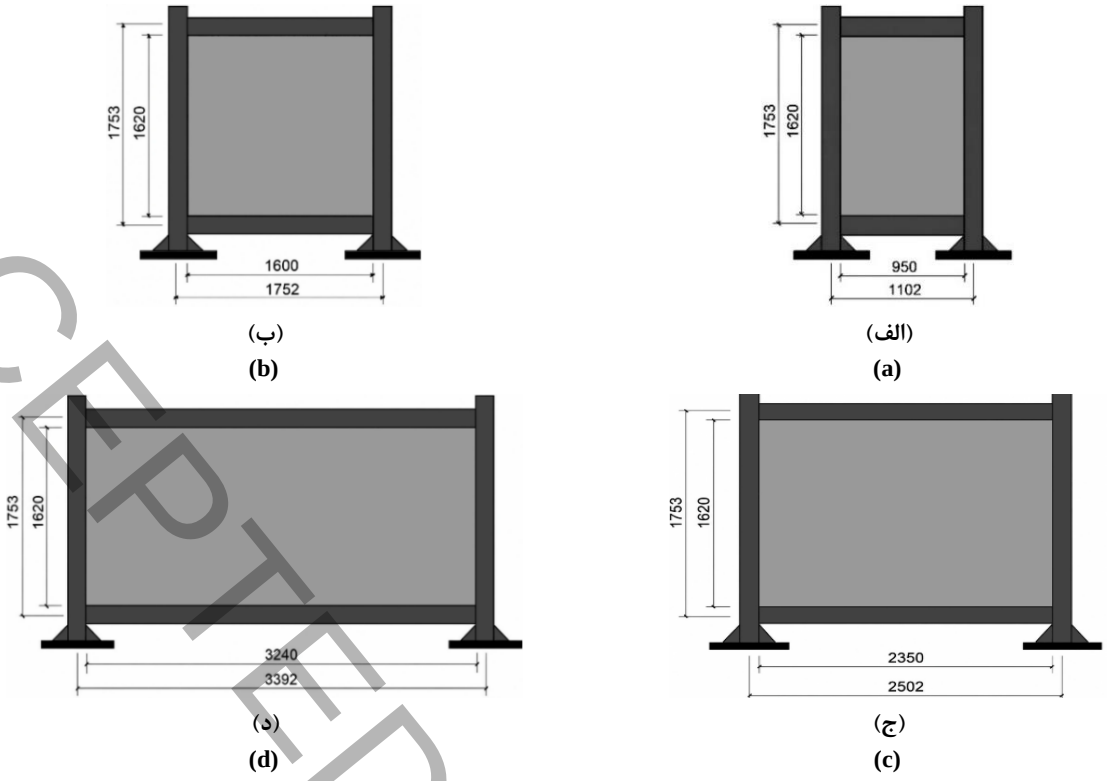
۳-۱- مشخصات نمونه‌ها

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی کارایی روابط موجود در منابع دستک قطری معادل برای میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی، مجموعه‌ای شامل ۳۲ نمونه میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های انتخاب‌شده براساس مطالعه هاشمی و همکاران [۶] در نظر گرفته شده است؛ در این مطالعه، رفتار درون صفحه میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی محصور در قاب‌های فولادی با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی، متکی بر نتایج آزمایشگاهی [۱]، مورد تحلیل قرار گرفته است. برای هر نمونه، سختی جانبی و مقاومت نهایی سیستم در دو حالت قاب خالی و قاب مجهز به میان‌قاب گزارش شده است که این داده‌ها به‌عنوان مبنای اصلی در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه‌های مورد مطالعه از نظر نسبت ابعاد طول دهانه به ارتفاع قاب، سختی خمشی قاب محصورکننده، ضخامت لایه‌های بتن پاششی و مقاومت فشاری بتن پاششی با یکدیگر تفاوت داشتند؛ بازه تغییرات این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس یک مطالعه پارامتری از نوع "تغییر یک پارامتر در هر مرحله" تعریف شده‌اند. بدین‌صورت که نمونه مرجع، متناظر با نتایج آزمایشگاهی، شامل قاب استاندارد، ضخامت کل بتن پاششی ۷ سانتی‌متر در دو طرف دیوار و مقاومت فشاری ۱۰ مگاپاسکال بوده و در چهار نسبت ابعادی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، اثر تغییر هر یک از پارامترهای نوع قاب، ضخامت بتن پاششی و مقاومت فشاری به‌صورت مستقل ارزیابی شده است. در مقابل، سایر پارامترها نظیر نوع و ضخامت مغزه پلی‌استایرن، مشخصات شبکه‌های فولادی، درصد آرماتورگذاری، شرایط مرزی، نحوه اتصال میان‌قاب به قاب و فرضیات مدل‌سازی، در تمامی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده‌اند تا اثر پارامترهای متغیر به‌صورت مستقل و قابل مقایسه مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، به‌منظور تمرکز صرف بر رفتار درون‌صفحه میان‌قاب‌ها، هیچ‌گونه بار قائم به نمونه‌ها اعمال نشده و تمامی پانل‌ها بدون در نظر گرفتن بازشو مدل‌سازی شده‌اند. نمای کلی سیستم در چهار نسبت ابعادی مختلف، به همراه جزئیات هندسی مربوطه، در شکل ۴ ارائه شده است.

جدول ۱. بازه تغییرات پارامترهای هندسی و مکانیکی سیستم قاب میان‌پر پانل ساندویچی بتنی
Table 1. Geometric and mechanical parameter ranges of the CSP–infilled frame system

پارامتر مؤثر	بازه تغییرات	واحد
نسبت ابعاد (L_i/h_i)	۰/۶، ۱، ۱/۴، ۲	-
مقاومت فشاری بتن پاششی (f_{shot})	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰	MPa
ضخامت کل بتن پاششی دو طرف دیوار (t)	۴، ۷، ۱۲	Cm
سختی خمشی قاب فولادی (f_{shot})	ضعیف، استاندارد، قوی	-

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۴. نمای کلی و جزئیات هندسی قاب‌های فولادی میان‌پُر با نسبت ابعادی: (الف)۰/۶ (ب) ۱ (ج) ۱/۴ (د) ۲ [۶]

Figure 4. Overall view and geometric details of the steel frames infilled with aspect ratios of: (a) 0.6, (b) 1, (c) 1.4, (d) 2

قاب‌های محصورکننده نمونه‌ها از جنس فولاد نرمه است و براساس سختی خمشی مقطع تیر و ستون در سه گروه قاب‌های ضعیف، متوسط و قوی طبقه‌بندی شده‌اند. مشخصات مقاطع تیر و ستون هر یک از این گروه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، اصلاحات لازم در اتصالات تیر و ستون اعمال شده است تا اثر کامل سختی خمشی قاب بر رفتار درون‌صفحه‌ای سیستم به‌طور دقیق در نتایج لحاظ شود. در مطالعه آزمایشگاهی مرجع، میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی به‌وسیله میلگردهای فولادی L شکل با قطر ۸ میلی‌متر و طول ۴۵ سانتی‌متر، با فاصله‌ای در حدود ۶۰ سانتی‌متر در پیرامون پانل، به قاب فولادی پیرامونی متصل شده‌اند تا انتقال مناسب نیرو بین قاب و میان‌قاب تأمین شود. در مطالعه عددی مرجع نیز، به‌منظور بازتولید رفتار مشاهده‌شده در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی اندرکنش بین میان‌قاب و قاب فولادی، از المان واسط خطی با ضخامت صفر و آرایش گره‌ای ۲+۲ (L8IF) استفاده شده است. بار جانبی در تراز تیر فوقانی قاب به‌صورت شبه‌استاتیکی توسط جک هیدرولیکی دوطرفه اعمال شده و بارگذاری چرخه‌ای بر اساس پروتکل کنترل تغییرمکان انجام گرفته است. اطلاعات تکمیلی مربوط به آرایش آزمایش، شرایط مرزی و جزئیات مدل‌سازی در مراجع [۱] و [۶] ارائه شده است.

جدول۲. مشخصات مقاطع قاب‌های فولادی

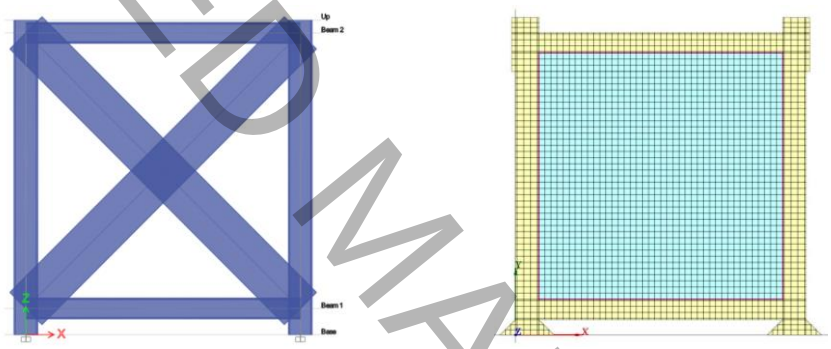
Table 2. Steel frame section properties

نوع قاب	مقطع ستون	ممان‌اینرسی ستون (cm^4)	مقطع تیر	ممان‌اینرسی تیر (cm^4)
قوی	HEA200	۳۶۹۲	HEA180	۲۵۱۰
استاندارد	HEA160	۱۶۷۳	HEA140	۱۰۳۳
ضعیف	HEA140	۱۰۳۳	HEA120	۶۰۶

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲-۳-حل مسئله معکوس

به‌منظور استخراج عرض مؤثر واقعی دستک قطری معادل برای میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی، از رویکرد حل مسئله معکوس مبتنی بر هم‌ارزی سختی جانبی استفاده شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ایتبس [۳۱] قاب محصورکننده دقیقا مطابق با مشخصات نمونه مرجع مدل‌سازی شده و در گام نخست، با مقایسه سختی جانبی قاب خالی با مقادیر گزارش‌شده در پژوهش مرجع، صحت مدل‌سازی قاب مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. پس از اطمینان از صحت مدل، میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی در هر نمونه با در نظر گرفتن فرضیات مرسوم روابط پیشنهادی موجود به‌صورت یک دستک قطری معادل به قاب افزوده شد (شکل ۵). بدین صورت که ضخامت و مدول الاستیسیته دستک قطری برابر با مقادیر متناظر میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی فرض شده و اتصال دستک به قاب محصورکننده به صورت مفصلی مدل‌سازی شد که فقط امکان انتقال نیروی محوری را فراهم کند. لازم به ذکر است با توجه به ماهیت مرکب دیوارهای پانل ساندویچی بتنی تعیین مشخصات مکانیکی معادل مستلزم ساده‌سازی کنترل‌شده است. از آنجا که در محدوده پیش از ترک‌خوردگی، سختی درون‌صفحه‌ای سیستم عمدتاً توسط لایه‌های بتن پاششی تأمین می‌شود، در این پژوهش مشخصات مکانیکی دستک قطری معادل بر مبنای ویژگی‌های این لایه‌ها تعریف و اثر سایر اجزا به‌صورت ضمنی در فرآیند کالیبراسیون لحاظ شد. همچنین، با استناد به مقادیر پیشنهادی منابع آیین‌نامه‌ای [۳۲]، مدول الاستیسیته معادل بتن پاششی برابر با ۴۰ درصد مدول بتن پایه برای تمامی نمونه‌ها در نظر گرفته شد. بر این اساس و با استفاده از رابطه متداول $4700\sqrt{f_c}$ مدول الاستیسیته بتن پاششی به‌صورت $1880\sqrt{f_c}$ محاسبه شد.



(ب) (الف)

(b) (a)

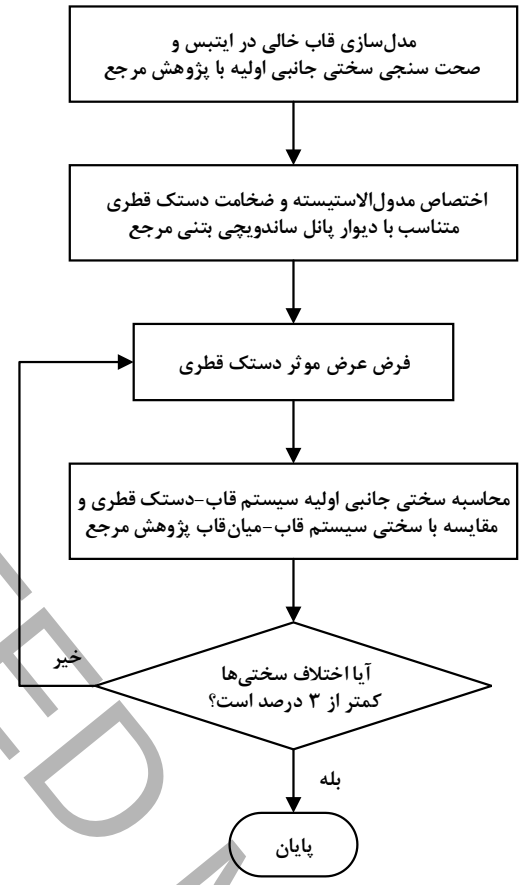
شکل ۵. الف) مدل‌سازی اجزا محدود سیستم قاب میان‌پر پانل ساندویچی بتنی

ب) مدل‌سازی سیستم معادل قاب و دستک قطری در نرم‌افزار ایتبس

Figure 5. (a) Finite element modeling of the concrete sandwich panel–infilled frame system
(b) Modeling of the equivalent frame and diagonal strut system in ETABS

در این مرحله، عرض مؤثر مقطع دستک قطری به‌صورت سعی و خطا تغییر داده شد تا اختلاف سختی جانبی سیستم قاب مجهز به دستک قطری با سختی جانبی گزارش‌شده برای سیستم قاب دارای میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی در پژوهش مرجع کمتر از ۳ درصد شود. این فرآیند برای تمامی ۳۲ نمونه مورد بررسی به‌طور مستقل تکرار شد و در نهایت، عرض مؤثر معادل دستک قطری برای هر نمونه استخراج شد. به‌منظور محاسبه سختی جانبی نمونه‌ها، بار جانبی به تراز بالایی قاب اعمال شده و پس از انجام تحلیل، سختی جانبی اولیه از نسبت نیروی جانبی اعمال‌شده به جابجایی متناظر در همان تراز به‌دست آمد. بدین ترتیب، عرض مؤثر استخراج‌شده دستک قطری به‌عنوان نماینده‌ای معادل از رفتار درون‌صفحه میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی در چارچوب روابط متداول دستک قطری مورد استفاده قرار گرفت. روند کلی مراحل انجام این فرآیند در فلوچارت ارائه‌شده در شکل ۶ نشان داده شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۶. فرآیند مسئله معکوس استخراج عرض مؤثر دستک قطری مبتنی بر هم ارزی سختی جانبی اولیه
Figure 6. Inverse problem solution flowchart for CSP strut width based on initial lateral stiffness

بررسی نسبت عرض مؤثر دستک قطری معادل حاصل از فرآیند مسئله معکوس به طول قطر پانل (W/d) نشان داد که در ۳۱ نمونه از ۳۲ نمونه مورد مطالعه، این نسبت در بازه $۰/۰ \leq W/d \leq ۰۸/۲۴$ قرار دارد که با محدوده پیشنهادی اسمیت [۱۱] انطباق دارد. تنها یک نمونه دارای نسبت ۰/۲۹ بود که مربوط به نمونه قاب قوی با نسبت ابعادی ۰/۶ است؛ نسبتی که مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش پنجم، استفاده از مدل دستک قطری معادل برای آن توصیه نمی‌شود. این انطباق را می‌توان تا حدی ناشی از فرض بنیادی مدل‌سازی دستک قطری معادل دانست؛ به‌گونه‌ای که تغییرات سختی مصالح میان‌قاب، عمدتاً از طریق مدول الاستیسیته دستک معادل بازتاب می‌یابد. لازم به تأکید است که عرض مؤثر استخراج‌شده در این فرآیند صرفاً به‌عنوان پارامتر معادل‌کننده سختی جانبی اولیه مورد استفاده قرار گرفته و لزوماً قادر به بازنمایی هم‌زمان سایر جنبه‌های رفتاری، از جمله مقاومت نهایی، نیست. ازاین‌رو، روابط اصلاح‌شده ارائه‌شده در این مطالعه برای تحلیل‌های مبتنی بر سختی اولیه پیشنهاد شده و کاربرد آن‌ها در تحلیل‌های غیرخطی یا برآورد مقاومت نیازمند مطالعات تکمیلی است.

۴- ارزیابی روابط موجود

پس از استخراج عرض مؤثر واقعی دستک قطری معادل برای تمامی ۳۲ نمونه میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی با استفاده از حل مسئله معکوس، روابط موجود پیشین برای محاسبه عرض مؤثر دستک قطری میان‌قاب‌های مصالح بنایی که در بخش مقدمه معرفی و تشریح شده‌اند، به‌منظور ارزیابی دقت و کارایی آن‌ها برای تمامی نمونه‌ها به‌کار گرفته شد. سپس مقادیر محاسبه‌شده عرض مؤثر هر رابطه با مقادیر مرجع استخراج‌شده مقایسه شد تا میزان خطای هر رابطه مشخص شود. میانگین مطلق خطا به‌عنوان شاخص اصلی ارزیابی انتخاب شد؛ زیرا این معیار بدون توجه به علامت خطا، میزان انحراف کلی هر رابطه از مقدار مرجع را به‌خوبی نشان می‌دهد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

علاوه بر این، ریشه میانگین مربعات خطا، انحراف معیار خطاها و بیشینه خطا برای هر رابطه محاسبه و نتایج آن‌ها در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳. ارزیابی عملکرد روابط دستک قطری معادل میان‌قاب‌های مصالح بنایی برای دیوارهای پانل ساندویچی بتنی
Table 3. Evaluation of masonry infill equivalent diagonal strut relationships for concrete sandwich panel walls

رابطه	میانگین مطلق خطا	ریشه میانگین مربعات خطا	انحراف معیار	بیشینه خطا
هولمز (۱۹۶۱)	۱۴۷/۰۴۵	۱۵۹/۰۷۹	۶۲/۰۳۶	۲۸۹/۰۵۱
اسمیث (۱۹۶۲)	۸۶/۰۸۳	۹۷/۰۲۵	۴۶/۰۷۷	۱۹۲/۰۱۳
مینستون (۱۹۷۱)	۲۱/۰۹۴	۲۶/۰۳۹	۱۹/۰۴۹	۶۳/۰۷۳
مینستون (آیین‌نامه‌ای) (۱۹۷۴)	۲۳/۰۳۰	۲۲/۰۷۸	۱۸/۰۵۰	۶۴/۰۱۸
لیاوو و کوان (۱۹۸۴)	۸۳/۰۹۸	۸۹/۰۹۵	۳۴/۰۸۲	۱۵۲/۰۴۸
دکانینی و فانتین (۱۹۸۷)	۱۲۴/۰۷۶	۱۳۴/۰۰۵	۴۹/۰۶۶	۲۴۱/۰۴۹
دورانی و لو (۱۹۹۴)	۳۸/۰۳۹	۴۳/۰۴۰	۲۵/۰۱۹	۸۴/۰۱۹
هندری (۱۹۹۸)	۱۴۰/۰۳۱	۱۴۸/۰۲۸	۴۸/۰۵۸	۲۳۹/۰۴۹
پاپیا و همکاران (۲۰۰۳)	۸۱/۰۰۱	۸۷/۰۶۶	۳۵/۰۸۷	۱۴۴/۰۶۹
کریسوستومو و آستریس (۲۰۱۲)	۲۸/۰۳۱	۳۵/۰۸۹	۲۸/۰۵۵	۸۸/۰۸۱
کمپیون و همکاران (۲۰۱۴)	۸۱/۰۰۱	۸۷/۰۶۶	۳۵/۰۸۷	۱۴۴/۰۶۹

بررسی نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که در میان روابط مورد مطالعه، رابطه مینستون (۱۹۷۱) بر اساس شاخص میانگین قدر مطلق خطا و رابطه مینستون (۱۹۷۴)، مورد پذیرش در ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰، بر اساس شاخص ریشه میانگین مربعات خطا، بیشترین انطباق را با مقادیر مرجع سختی جانبی اولیه میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی دارند. این نتایج نشان می‌دهد که رابطه مورد استفاده در استاندارد ۲۸۰۰، در مقایسه با سایر روابط موجود، عملکرد مناسب‌تری در برآورد سختی جانبی اولیه این سیستم‌ها دارد؛ با این حال، میزان خطای آن همچنان قابل توجه است.

۵- اصلاح روابط موجود با ضرایب ثابت

به‌منظور بهبود دقت روابط موجود در برآورد عرض مؤثر دستک قطری معادل میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی، یک ضریب اصلاح ثابت برای هر رابطه تعریف و اعمال شد. بدین منظور، برای هر رابطه، نسبت عرض مؤثر محاسبه‌شده به‌وسیله آن رابطه به مقدار واقعی استخراج‌شده از حل مسئله معکوس، برای هر یک از ۳۲ نمونه محاسبه شد. مقدار به‌دست‌آمده به‌عنوان ضریب اصلاح آن رابطه برای نمونه متناظر در نظر گرفته شد. سپس، با میانگین‌گیری از ضرایب اصلاح محاسبه‌شده برای همه نمونه‌ها، ضریب اصلاح کلی هر رابطه تعیین شد. با اعمال این ضریب اصلاح به رابطه متناظر، میانگین خطای روابط به صفر نزدیک شد و هم‌زمان، میانگین مطلق خطاها کاهش قابل‌توجهی نشان داد که بیانگر بهبود دقت کلی روابط اصلاح‌شده است. نتایج شاخص‌های آماری مربوط به عملکرد روابط اصلاح‌شده در جدول ۴ ارائه شده است.

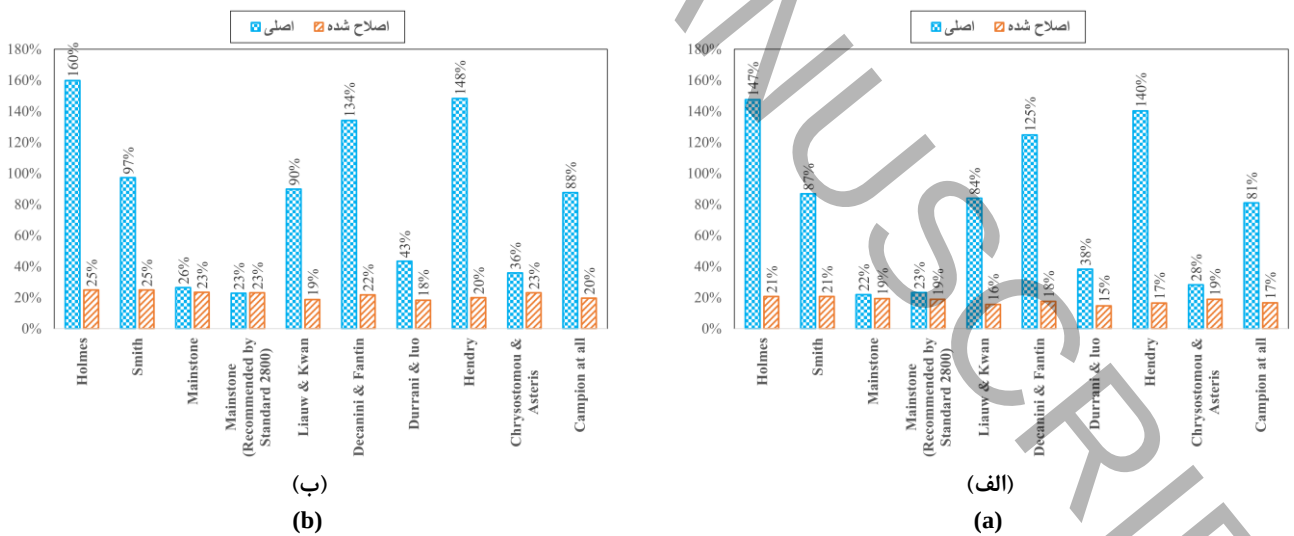
ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول۴. ارزیابی عملکرد روابط اصلاح شده دستک قطری معادل میان‌قاب‌های مصالح بنایی برای دیوارهای پانل ساندویچی بتنی

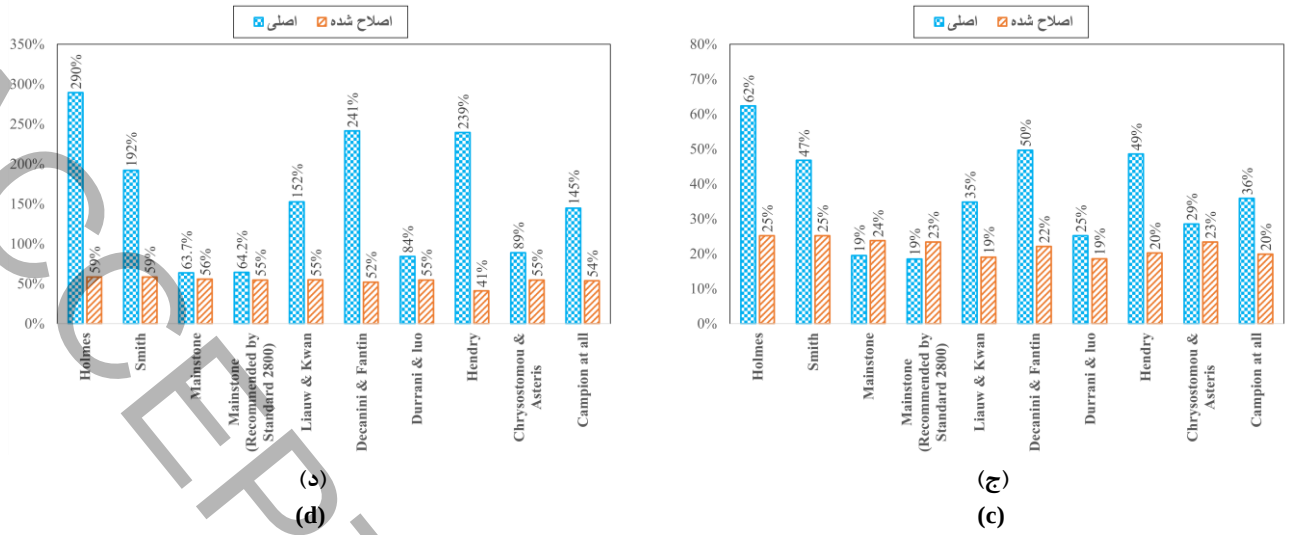
Table 4. Evaluation of modified masonry infill equivalent diagonal strut relationships for concrete sandwich panel walls

رابطه	ضریب اصلاح	میانگین مطلق خطا	ریشه میانگین مربعات خطا	انحراف معیار	بیشینه خطا
هولمز (۱۹۶۱)	۰/۴۰	۲۰/۷۳٪	۲۴/۸۸٪	۲۵/۲۰٪	۵۸/۵۳٪
اسمیث (۱۹۶۲)	۰/۵۴	۲۰/۷۳٪	۲۴/۸۸٪	۲۵/۲۰٪	۵۸/۵۳٪
مینستون (۱۹۷۱)	۱/۲۲	۱۹/۴۳٪	۲۳/۴۹٪	۲۳/۷۹٪	۵۵/۷۴٪
مینستون (آیین‌نامه‌ای) (۱۹۷۴)	۱/۲۶	۱۸/۹۸٪	۲۳/۰۶٪	۲۳/۳۶٪	۵۴/۷۸٪
لیاوو و کوان (۱۹۸۴)	۰/۵۵	۱۵/۶۸٪	۱۸/۷۸٪	۱۹/۰۲٪	۵۴/۸۱٪
دکانینی و فانتین (۱۹۸۷)	۰/۴۴	۱۷/۶۵٪	۲۱/۸۲٪	۲۲/۱۰٪	۵۱/۹۴٪
دورانی و لو (۱۹۹۴)	۰/۷۴	۱۴/۶۸٪	۱۸/۳۵٪	۱۸/۵۸٪	۵۴/۷۴٪
هندری (۱۹۹۸)	۰/۴۲	۱۶/۵۷٪	۱۹/۹۶٪	۲۰/۲۱٪	۴۱/۲۷٪
پاپیا و همکاران (۲۰۰۳)	۰/۵۵	۱۶/۷۴٪	۱۹/۶۶٪	۱۹/۹۱٪	۵۳/۷۰٪
کریسوستومو و آستریس (۲۰۱۲)	۰/۸۲	۱۸/۹۸٪	۲۳/۰۶٪	۲۳/۳۶٪	۵۴/۷۸٪
کمپیون و همکاران (۲۰۱۴)	۰/۵۵	۱۶/۷۴٪	۱۹/۶۶٪	۱۹/۹۱٪	۵۳/۷۰٪

نتایج نشان داد روابط مینستون که پیش از اعمال ضریب اصلاح کمترین میزان خطا را در میان روابط بررسی‌شده ارائه نمودند، پس از محاسبه و اعمال ضریب اصلاح ثابت، بهبود قابل توجهی در شاخص‌های ارزیابی خود نشان ندادند. در مقابل، اگرچه رابطه دورانی و لو در حالت اولیه دقت کمتری نسبت به برخی روابط دیگر داشت، اما پس از اعمال یک ضریب اصلاح ثابت، کمترین مقدار میانگین مطلق خطا را در میان تمامی روابط اصلاح‌شده نشان داد. این رفتار حاکی از آن است که رابطه دورانی و لو از نظر حساسیت نسبت به پارامترهای مؤثر هندسی و مکانیکی، تطابق مناسبی با روند تغییرات پاسخ واقعی میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی دارد، اما در فرم اولیه خود دچار یک انحراف سیستماتیک است. حذف این انحراف سیستماتیک از طریق اعمال ضریب اصلاح ثابت باعث شد توان پیش‌بینی این رابطه به‌طور محسوسی بهبود یابد و نتایجی دقیق‌تر نسبت به سایر روابط اصلاح‌شده ارائه دهد. نمودار مقایسه نتایج مطالعه آماری روابط در شکل ۷ قابل مشاهده است.



ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۷. مقایسه شاخص‌های خطای روابط دستک قطری معادل قبل و بعد از اعمال ضریب اصلاح

الف) میانگین مطلق خطاها ب) ریشه میانگین مربعات خطا ج) انحراف معیار د) بیشینه خطا

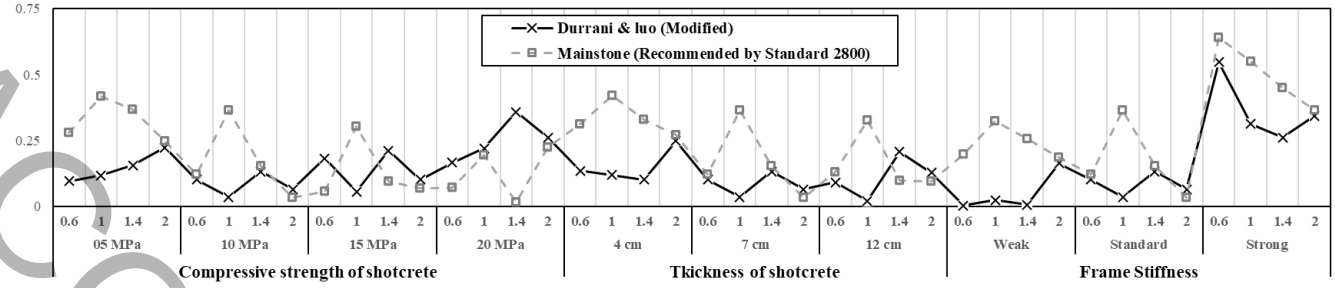
Figure 7. Comparison of error indices for equivalent diagonal strut relationships before and after applying the correction factor

(a) mean absolute error (MAE), (b) root mean square error (RMSE), (c) standard deviation, (d) maximum error

لازم به ذکر است که ضرایب اصلاح پیشنهادی در این پژوهش بر اساس پایگاه داده موجود، شامل ۳۲ نمونه برگرفته از یک مطالعه آزمایشگاهی مرجع و تحلیل‌های عددی متناظر، استخراج شده‌اند. ازاین‌رو، دامنه کاربرد این ضرایب به محدوده پارامترهای هندسی، مکانیکی و شرایط اتصال مورد بررسی محدود بوده و تعمیم آن‌ها به سایر پیکربندی‌ها، مشخصات مصالح و شرایط بارگذاری نیازمند مطالعات آزمایشگاهی و عددی بیشتری است. بنابراین، ضرایب ارائه‌شده باید به‌عنوان گامی اولیه در ارزیابی و بهبود کاربرد روابط دستک قطری معادل برای میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی تلقی شوند. همچنین، توسعه یک رابطه اختصاصی برای این نوع میان‌قاب‌ها بر پایه پایگاه داده‌های گسترده‌تر می‌تواند به‌عنوان یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد.

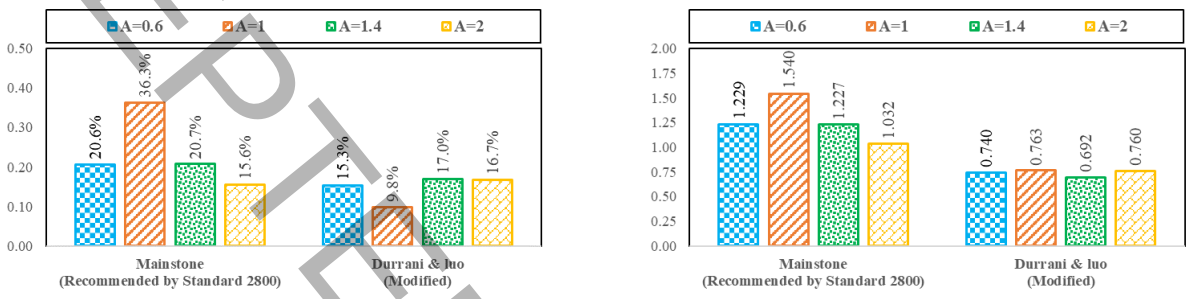
به‌منظور ارزیابی عمیق‌تر رفتار خطا و بررسی وابستگی آن به پارامترهای مؤثر، تغییرات خطای مطلق دو مدل منتخب، یعنی رابطه مینستون به‌عنوان مبنای مورد استفاده در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش پنجم و یکی از دقیق‌ترین روابط پیش از اعمال ضرایب اصلاح، و رابطه اصلاح‌شده دورانی و لو به‌عنوان رابطه‌ای که پس از اعمال ضریب اصلاح، بهترین عملکرد آماری را در پایگاه داده حاضر ارائه کرده است، در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر اغلب مشخصات هندسی و مکانیکی نمونه‌ها، روند یکنواخت و مشخصی در تغییرات خطا مشاهده نمی‌شود. این موضوع را می‌توان به ماهیت تجربی روابط دستک قطری معادل نسبت داد، زیرا این روابط برای بازنمایی تقریبی رفتار کلی سیستم توسعه یافته‌اند و انتظار نمی‌رود تغییر هر پارامتر به‌تنهایی به روند مشخصی در میزان خطای آن‌ها منجر شود. علاوه بر این، در اغلب نمونه‌ها، رابطه اصلاح‌شده دورانی و لو نسبت به رابطه مینستون خطای کمتری دارد. همچنین بیشترین میزان خطا مربوط به نمونه دارای قاب قوی و نسبت ابعادی ۰/۶ است. شایان ذکر است که این نمونه خارج از دامنه توصیه‌شده برای کاربرد مدل دستک قطری معادل قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش پنجم استفاده از مدل دستک قطری معادل را برای مدل‌سازی میان‌قاب‌های با نسبت ابعادی کمتر از یک مجاز نمی‌داند. ازاین‌رو، به‌منظور بررسی اثر نسبت ابعادی پانل و تاثیر آن بر عملکرد روابط منتخب، روند ضرایب اصلاح ثابت پیشنهادی به همراه میانگین مطلق خطا در نسبت‌های ابعادی مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. شایان ذکر است که ضرایب اصلاحی ارائه‌شده در شکل ۹- الف صرفاً به‌منظور بررسی وابستگی ضریب اصلاح به نسبت ابعادی محاسبه شده‌اند. همچنین نتایج مربوط به رابطه مینستون در شکل ۹-ب، با توجه به عملکرد اولیه مناسب آن و جایگاه آن به‌عنوان رابطه پیشنهادی در ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰، بدون اعمال ضریب اصلاح ارائه شده‌اند. مطابق شکل ۹ نتایج نشان می‌دهد که با وجود تغییر مقادیر ضریب اصلاح و میانگین مطلق خطا در نسبت‌های ابعادی مختلف، هیچ روند یکنواخت و مشخصی میان نسبت ابعادی و شاخص‌های مدنظر مشاهده نمی‌شود؛ ازاین‌رو، استفاده از یک ضریب اصلاح ثابت در چارچوب این پژوهش مناسب تشخیص داده شد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۸. نمودار خطا روابط منتخب در برابر مشخصات نمونه‌های میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی

Figure 8. Error plots of the selected relationships against the characteristics of concrete sandwich panel–infilled specimens



(ب) (الف)

(b) (a)

شکل ۹. (الف) تغییرات ضریب اصلاح ثابت بر حسب نسبت ابعادی (ب) تغییرات میانگین مطلق خطا بر حسب نسبت ابعادی

Figure 9. (a) Variation of the constant correction factor with aspect ratio, (b) variation of the MAE with aspect ratio

۶- نتیجه گیری

با انتشار ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ و ارائه ضوابط مدون برای مدل‌سازی میان‌قاب‌های مصالح بنایی بر پایه مدل دستک قطری معادل، ارزیابی قابلیت تعمیم این رویکرد به سیستم‌های نوین، از جمله میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی، اهمیت ویژه‌ای یافته است. در این پژوهش، کارایی روابط متداول دستک قطری معادل که معمولاً برای دیوارهای مصالح بنایی توسعه یافته‌اند، در پیش‌بینی رفتار درون‌صفحه میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، مقادیر مرجع عرض مؤثر دستک قطری برای ۳۲ نمونه عددی توسعه یافته بر پایه یک مطالعه آزمایشگاهی، با استفاده از رویکرد حل مسئله معکوس مبتنی بر هم‌ارزی سختی جانبی اولیه استخراج و به‌عنوان مبنای مقایسه با روابط موجود در منابع به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که در میان روابط موجود، رابطه مینستون (۱۹۷۴)، مورد پذیرش در ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰، کمترین ریشه میانگین مربعات خطا و عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر روابط موجود داشته و بیشترین انطباق را با مقادیر مرجع عرض مؤثر دستک قطری نشان داد. این یافته بیانگر آن است که رویکرد پذیرفته‌شده در استاندارد ۲۸۰۰، در مقایسه با سایر روابط موجود، مبنای مناسب‌تری برای مدل‌سازی میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی فراهم می‌کند. با این حال، میزان خطای این رابطه در برخی نمونه‌ها همچنان قابل توجه است که بیانگر محدودیت تعمیم مستقیم ضوابط موجود به میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی است. در گام بعد، به‌منظور افزایش انطباق روابط موجود با پایگاه داده مورد مطالعه، ضرایب اصلاحی ثابت برای روابط مختلف محاسبه و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که رابطه دورانی و لو، اگرچه در حالت اولیه دارای انحراف قابل ملاحظه‌ای از مقادیر مرجع بود، پس از اعمال ضریب اصلاحی ثابت ۰/۷۳۸، با میانگین قدر مطلق خطا و بیشینه خطای مطلق به‌ترتیب برابر با ۱۴ و ۵۵ درصد، بالاترین دقت پیش‌بینی را در میان روابط اصلاح‌شده برای پایگاه داده مورد مطالعه نشان داد.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه رابطه مورد پذیرش در ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ در مقایسه با سایر روابط موجود عملکرد مناسب‌تری در برآورد عرض مؤثر دستک قطری میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی دارد، استفاده مستقیم از

ACCEPTED MANUSCRIPT

روابط متداول دستک قطری معادل برای این سیستم‌ها همچنان با خطاهای قابل توجهی همراه است. همچنین، اعمال ضرایب اصلاحی ثابت بر روابط موجود، به افزایش دقت آن‌ها در برآورد عرض مؤثر دستک قطری برای نمونه‌های پایگاه داده مورد مطالعه منجر شد. با این وجود، باقی‌ماندن خطاهای قابل ملاحظه نشان می‌دهد که به دلیل تفاوت‌های اساسی میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی با میان‌قاب‌های مصالح بنایی، از جمله ساختار لایه‌ای، رفتار مرکب مصالح و ویژگی‌های مکانیکی متفاوت، رفتار این سیستم‌ها به‌طور کامل با مفروضات روابط موجود همخوانی ندارد. ازاین‌رو، توسعه روابط اختصاصی مبتنی بر ویژگی‌های هندسی و مکانیکی میان‌قاب‌های پانل ساندویچی بتنی می‌تواند به‌عنوان مسیری ضروری برای تکمیل ضوابط موجود و مطالعات آتی مطرح شود.

مراجع

[1] S.J. Hashemi, J. Razzaghi, A.S. Moghadam, P.B. Lourenço, Cyclic testing of steel frames infilled with concrete sandwich panels, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18(2) (2018) 557-572.
[2] M. Palermo, T. Trombetti, Experimentally-validated modelling of thin RC sandwich walls subjected to seismic loads, Engineering Structures, 119 (2016) 95-109.
[3] I. Ricci, M. Palermo, G. Gasparini, S. Silvestri, T. Trombetti, Results of pseudo-static tests with cyclic horizontal load on cast in situ sandwich squat concrete walls, Engineering Structures, 54 (2013) 131-149.
[4] D. Tomlinson, A. Fam, Flexural behavior of precast concrete sandwich wall panels with basalt FRP and steel reinforcement, in, 2015.
[5] B.A. Frankl, G.W. Lucier, T.K. Hassan, S.H. Rizkalla, Behavior of precast, prestressed concrete sandwich wall panels reinforced with CFRP shear grid, PCI Journal, 56(2) (2011) 42-54.
[6] S.J. Hashemi, J. Razzaghi, P.B. Lourenço, In-plane Behavior of Concrete Sandwich Panels Bounded by Steel Frames: A Numerical Analysis Approach, International Journal of Civil Engineering, 20(8) (2022) 885-905.
[7] Mohammad J. Ranjbar, Seyed J. Hashemi, P. Zakian, Fundamental Period of Steel Moment-Resisting Frames Infilled With Concrete Sandwich Panels, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 34(5) (2025) e70012.
[8] H. Omidvar, S.J. Hashemi, M. Yazdani, In-plane Behavior of Steel Frames with Various Infill Materials; A Parametric Finite Element Study (in persian), Civil Infrastructure Researches, 11(1) (2025) 203-215.
[9] H. Road, C. Urban Development Research, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No. 2800), 5th Edition, ISIRI 2800, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran, 2026.
[10] W. El-Dakhakhni Wael, M. Elgaaly, A. Hamid Ahmad, Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames, Journal of Structural Engineering, 129(2) (2003) 177-185.
[11] M. Holmes, STEEL FRAMES WITH BRICKWORK AND CONCRETE INFILLING, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 19(4) (1961) 473-478.
[12] S. Smith Bryan, Lateral Stiffness of Infilled Frames, Journal of the Structural Division, 88(6) (1962) 183-199.
[13] S. Smith Bryan, Behavior of Square Infilled Frames, Journal of the Structural Division, 92(1) (1966) 381-404.
[14] S. Smith Bryan, Methods for predicting the lateral stiffness and strength of multi-storey infilled frames, Building Science, 2(3) (1967) 247-257.
[15] S. Smith Bryan, C. Carter, A METHOD OF ANALYSIS FOR INFILLED FRAMES, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 44(1) (1969) 31-48.
[16] M. Hetényi, Beams on Elastic Foundation: Theory with Applications in the Fields of Civil and Mechanical Engineering, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1946.
[17] R.J. Mainstone, On the stiffnesses and strengths of infilled frames, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Supplement (IV), (1971) 57-90.
[18] R.J. Mainstone, Supplementary note on the stiffness and strengths of infilled frames, (1974).
[19] A. Federal Emergency Management, NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1997.
[20] A. Federal Emergency Management, Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1998.
[21] L. Te-Chang, K. Kwok-Hung, Nonlinear behaviour of non-integral infilled frames, Computers & Structures, 18(3) (1984) 551-560.
[22] L.D. Decanini, G.E. Fantin, Modelos simplificados de la mampostería incluida en pórticos: Características de rigidez y resistencia lateral en estado límite, in: Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural III, Asociación de Ingenieros Estructurales, Buenos Aires, Argentina, 1987, pp. 817-836.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[23] A.J. Durrani, Y.H. Luo, Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills, in: Proceedings of the NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry Infills, National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), Buffalo, NY, 1994.
[24] A.W. Hendry, Structural Masonry, Macmillan Press, London, 1998.
[25] M. Papia, L. Cavaleri, M. Fossetti, Infilled frames: Developments in the evaluation of the stiffening effect of infills, Structural Engineering and Mechanics, 16 (2003) 675-693.
[26] P.G. Asteris, S.T. Antoniou, D.S. Sophianopoulos, C.Z. Chrysostomou, Mathematical Macromodeling of Infilled Frames: State of the Art, Journal of Structural Engineering, 137(12) (2011) 1508-1517.
[27] C.Z. Chrysostomou, P.G. Asteris, On the in-plane properties and capacities of infilled frames, Engineering Structures, 41 (2012) 385-402.
[28] G. Campione, L. Cavaleri, G. Macaluso, G. Amato, F. Di Trapani, Evaluation of infilled frames: an updated in-plane-stiffness macro-model considering the effects of vertical loads, Bulletin of Earthquake Engineering, 13 (2014) 2265-2281.
[29] S. Raheem, J. Thamboo, C. Mallikarachi, K. Wijesundara, P. Dias, Infill Masonry Strut Models in Reinforced Concrete Frames: Multilevel Reliability Analyses for Predicting In-Plane Responses, Earthquake Engineering and Resilience, 5(1) (2026) 78-101.
[30] S.A. Asadzadeh, M. Mohammadi, N.K.A. Attari, S.A. Zareei, Experimental Study on Finding Reliable Connectors for Infill-frame Connection in Infilled Steel Frame, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(12) (2022) 5259-5280.
[31] Computers, I. Structures, ETABS: Integrated Building Design Software, in, Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA, 2021.
[32] Management, I. Planning Organization of, Instruction for Design, Manufacturing, and Installation of 3D Sandwich Panels (Publication No. 385), Publication No. 385, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, 2012.

ACCEPTED MANUSCRIPT