

## قابلیت اطمینان دیوارهای برشی بر پایه فولاد سرد نورد شده، تحت تاثیر تنوع در

### واکنش اتصال دهنده ها

#### چکیده

هدف از این مقاله، بررسی قابلیت اطمینان دیوارهای برشی بر پایه فولاد سرد نورد شده با تاکید خاص بر روی دیوار حاوی پل‌های ساختار چوبی است. یک دیوار برشی پوسته پوسته بر پایه فولاد سرد نورد شده، سیستمی متشکل از ستون‌ها، شیارها، و غالباً حاوی پل‌ها بوده و سبب مسدود کردن اتصالات فولاد به فولاد و پوشش به فولاد می‌گردد. دیوارهای برشی ممکن است به‌طور یکپارچه به پایه‌ها، کف‌ها و یا دیگر دیوارهای برشی از طریق ابزارهای مختلف از جمله پایین نگه داشتن، تسمه‌ها، دیافراگم آکورد و کلکتورها متصل شوند. مقاومت جانبی دیوار برشی در ساختمان‌های تشکیل شده از فولاد نورد شده، متفاوت است چون؛ اجزا و اتصالاتی که دیوار را تشکیل می‌دهند، تصادفی انتخاب می‌شوند. تعامل بین اتصال‌دهنده‌ها و پوشش دهنده‌ها بسیار مهم است زیرا (1) اتصال‌دهنده‌ی پوشش به فولاد، پاسخ منبع اصلی دیوار برشی غیرخطی است (2) متغیرهای بالا در واکنش این اتصال‌دهنده‌ها وجود دارد. اگرچه مقادیر قدرت اسمی متفاوت برای تنظیمات دیوار برشی در هنگام طراحی مشخص شده است (به عنوان مثال، AISI S400)، اما تغییرپذیری دیوارهای برشی به‌طور صریح در نظر گرفته نشده است. فاکتورهای مقاومت با توجه به آزمایش حاصل از دیافراگم فولاد مشخص خواهند شد. برای بررسی تأثیر واکنش اتصال‌دهنده بر قابلیت اطمینان دیوار برشی، از شبیه‌سازی مونت کارلو برای دیوارهای برشی بر پایه فولاد سرد نورد شده حاوی چوب با ورودی تصادفی اتصال دهنده بهره گرفته شده است. متغیر در اتصال‌دهنده‌ها براساس آزمون‌های فیزیکی اتصال‌دهنده تعیین شد. خواص قدرت دیوار برشی، بستگی به نسبت ظرفیت اتصال‌دهنده‌های کلیدی، و همچنین رابطه بین قدرت اتصال و قدرت دیوار برشی دارد. ارزیابی قابلیت اطمینان برای چهار روش مختلف طراحی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مزایای قدرت دیوار برشی یک سیستم که به موجب آن تغییرپذیری در واکنش

اتصال دهنده رخ می دهد، منجر به کاهش توزیع و کاهش تنوع در قدرت کلی دیوار برشی می گردد. این کاهش جزئی، تقریباً 3٪، در قدرت متوسط سیستم باید در نظر گرفته شود.

## 1- مقدمه

ساختار سیستم های حاوی فولاد سرد نورد شده (CFS) معمولاً برای ساخت و ساز کم و متوسط مورد استفاده قرار می گیرد. در طراحی ساختمان ها با استفاده از CFS، دیوارهای برشی معمولاً برای ارائه مقاومت جانبی برای تحمل بارهای لرزه ای یا بادی مورد استفاده قرار می گیرند (به عنوان مثال، به شکل 1 رجوع کنید). معمولاً، پوشش چوب، مانند تخته ای لایه ای جهت دار (OSB)، به دسته های CFS و شیارها برای ایجاد سختی برشی جانبی و ایجاد قدرت متصل شده است (به عنوان مثال، به شکل 2 رجوع کنید).

یک ناسازگاری بین شکل CFS در دیوار بریده شده وجود دارد، که عمدتاً به دلیل همگرایی تغییر شکل به وجود می آید، و پوسته ای چوبی که تقریباً مستطیلی است، در درجه ای اول وظیفه ای انتقال و چرخش سختی در صفحات را برعهده دارد.

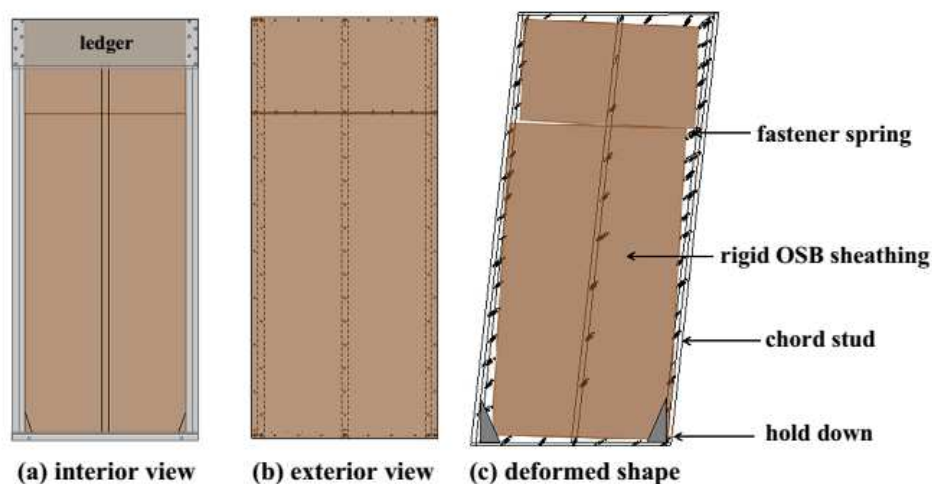
ناسازگاری بین فریم تغییر شکل داده و پوشش باعث ایجاد جابجایی نسبی می شود که باید در اتصال دهنده ها جای بگیرد. این جابجایی باعث کج شدن و خم شدن اتصال دهنده، و همچنین تغییر شکل و آسیب به فولاد و مواد پوششی چوب در اطراف اتصال دهنده می شوند. این آسیب منبع تولید و اتلاف انرژی در این سیستم ها است [1،2]. همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است؛ نتیجه ای کلی دیوار برشی حاوی فریم CFS و پوشش چوبی، باعث تخریب و خرد شدن قابل توجهی در سیکل هیستریزیس می شود.

دیوارهای برشی حاوی فریم CFS و پوشش چوبی، به طور گسترده مورد آزمایش قرار گرفته اند. در آمریکای شمالی AISI S400-15 [3] (قبلاً AISI S213-07 و AISI S213-07 [4]) مقاومت اسمی دیوار برشی را برای نوع های متفاوت پوشش، فاصله اتصال دهنده، و ضخامت دسته ها و شیارها براساس آزمایش های موجود ارائه می کند (به عنوان مثال، به مراجع [5،6] مراجعه کنید). مقاومت دیوار برشی در AISI S400 براساس ظرفیت آزمایش های انجام

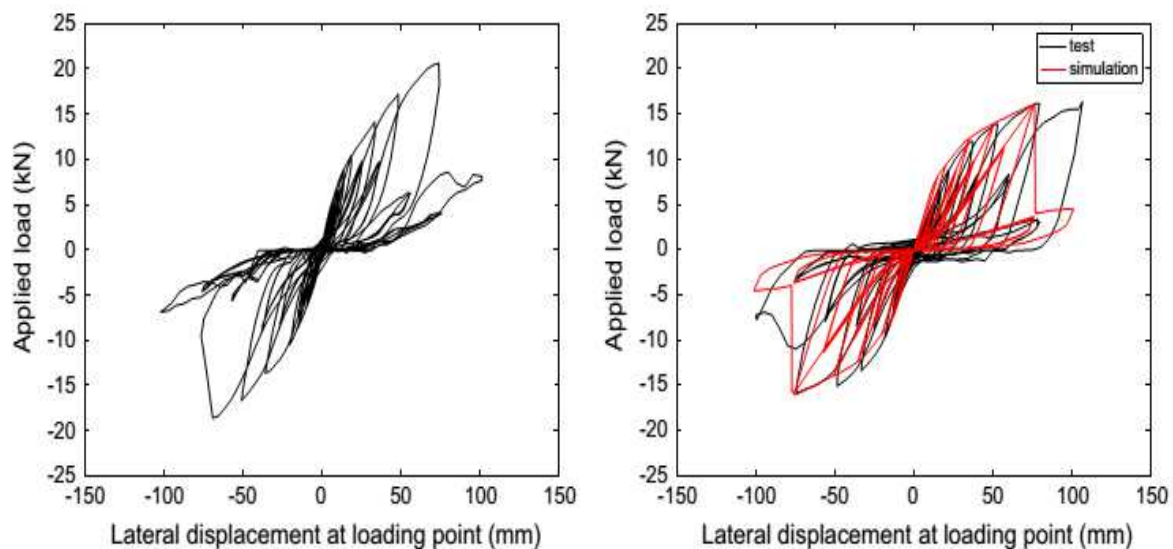
شده و  $\phi = 0.6$ ، برای طراحی فاکتورهای مقاومتی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. این مقادیر ابتدا براساس نوع/ مقدار برای دیافراگم‌های دسته‌های فولادی، انتخاب شده است (که براساس آن یک حالت محدودیت شکست اتصال و یک هدف قابلیت اطمینان،  $b$ ، از  $3/5$ ، به وجود می‌آید) و همچنان این مقادیر اضافی در جداول استاندارد گنجانده شده است.



شکل 1: ساختمان CFS-NEES و دیوار برشی در داخل آن



شکل 2: نمونه‌ی دیوار برشی حاوی فولاد سرد نورد شده در قالب سنگ یک ساختمان



شکل 3: پاسخ سیکل دیوار برشی حاوی فریم CFS و چوب پوسته پوسته شده (الف) نمونه پاسخ آزمایشگاهی

(برگرفته شده از [1])، (ب) مقایسه نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی (برگرفته شده از [2])

دیوارهای برشی حاوی فریم CFS ممکن است به عنوان یک ساختار کوچک در نظر گرفته شوند و قابلیت اطمینان سیستم برای سازه‌های فولادی، به‌طور مشخص در [7]، و ساختار CFS به‌طور خاص در [9]، اخیراً مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌های شبیه‌سازی مونت کارلو (MC) در فریم‌های فولادی برای ارزیابی اجزای سازگار سیستم و کشف عوامل سیستم‌های مقاومتی (/) بر پایه‌ی ریسک هدف سیستم در مقایسه با قابلیت اطمینان قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد [8]. نشان داده شده است که قابلیت اطمینان سیستم حاوی نوعی فریم CFS تحت تأثیر گرانش به مراتب بیش از قابلیت اطمینان اجزاء است [9]. همچنین، قدرت نگهداری CFS در فریم-CFS برای دیافراگم کف در نظر گرفته شده و به عنوان یک سیستم محاسبه شده است [10].

شناختن نقش مرکزی و پاسخ غیرخطی در اتصالات پوشش-اتصال‌دهنده-فولاد روی دیوار برشی کلی، توسط بوناپان و همکاران بررسی شده است. آنها OpenSees را توسعه و اعتبارسنجی کردند تا یک شبیه‌سازی را برای فریم-CFS و پوشش چوبی در یک سیکل دیوار برشی پیش‌بینی کنند [11]. این مدل، پتانسیلی را برای انجام شبیه‌سازی MC در دیوارهای برشی حاوی فریم CFS و کشف کردن تنوع و قابلیت اطمینان برای پاسخ به آنها را

فراهم می‌کند. پتانسیل موجود راهکاری را برای بهبود ارزیابی قابلیت اطمینان فعلی در [3] AISI S400 فراهم می‌کند، که اساساً فقط براساس نتایج مهندسی، به‌دست آمده است.

بررسی و معتبرسازی مدل دیوار برشی توسط بوناپان و همکاران [11]، آزمایش دیوار برشی توسط لیو و همکاران [1]، و تست اتصال در پوشش- اتصال‌دهنده- فولاد توسط پاترن و همکاران [12] صورت پذیرفته است؛ این کارها به منظور انجام شبیه‌سازی‌های MC بر روی یک سری از دیوارهای برشی حاوی فریم- CFS و بررسی قابلیت اطمینان بر روی دیوارهای برشی مورد مطالعه، انجام گرفته است. آزمایش‌های اتصال‌دهنده، به‌صورت یک متغیر تصادفی شناخته شده و برای شبیه‌سازی MC روی دیوارهای برشی انتخاب شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی، خلاصه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند تا یک بینش درست را در مورد اهمیت بارگذاری مجدد، محل قرارگیری اتصال‌دهنده‌ها و منشا تغییر در قدرت دیوار برشی را ارائه دهند. در ادامه، قابلیت اطمینان در حداکثر قدرت براساس شبیه‌سازی MC تعیین می‌گردد. در نهایت چهار روش طراحی برای پتانسیل دیوار برشی در نظر گرفته شده است و قابلیت اطمینان این روش‌ها براساس داده‌های موجود، هم با توجه و هم بدون توجه به اثر سیستم در شبیه‌سازی MC به‌دست آمده است. این تحقیق، ضمن بحث در مورد کارهای آینده، به بررسی و بالابردن قابلیت اطمینان یک سیستم حاوی فریم- CFS پرداخته است.

## 2- انتخاب دیوارهای برشی حاوی فریم- CFS و پوسته پوسته‌ی OSB

بخشی از تلاش کلی تحقیق برای بهبود طراحی لرزه‌ای فریم- CFS، به‌نام اثرات CFS-NEES شناخته می‌شود (به مرجع [13] مراجعه کنید)، لیو و همکاران یک سری یکنواخت و سیکل فریم- CFS را اجرا کردند و دیوار برشی پوسته‌ی پوشیده شده‌ی OSB را آزمایش نمودند [1]. اثر جزئیات ساخت و ساز در رفتار دیوار برشی، شامل؛ ابعاد، ضخامت دسته‌ها، و محل جوش، و غیره است، که در آزمایشات مورد بررسی قرار گرفته است. پیکربندی نمونه‌ی دیوار برشی برای دیوارهای عرضی دارای ابعاد 1/22 متر و 2/44 متر است که در شکل 4 نشان داده شده است و جزئیات کامل‌تر در مرجع [1] ارائه شده است. این نتایج تجربی مستقل از آزمایشاتی است که برای فرموله

کردن AISI S400 استفاده می‌شود و از آنجایی که آنها تحت نظارت همان تیم تحقیقاتی انجام گرفته است، تمام جزئیات برای شبیه‌سازی‌های انجام شده در این قسمت در دسترس است.

دوازده پیکربندی دیوار برشی، همانطور که در جدول 1 خلاصه شده است، از آزمایش سری ليو برای ارزیابی قابلیت اطمینان دیوارهای برشی حاوی فریم CFS، انتخاب شده است. این دیوارهای مشابه توسط بوناپان و همکاران [11] نیز در نظر گرفته شده‌اند که در آن یک مدل برای پیش‌بینی قدرت براساس واکنش اتصال دهنده‌ی غیرخطی محلی، توسعه یافته است.

### 3- مدل‌سازی براساس اتصال‌دهنده‌های دیوارهای برشی حاوی فریم CFS

بوناپان و همکاران [11] یک مدل ساختاری را برای دیوارهای برشی حاوی فریم CFS و پوشش چوبی در نرم افزار OpenSees توسعه دادند. مدل ایجاد شده شامل عناصر کشسان تیر و ستون برای همه فریم‌های فولادی، عناصر دیافراگم صلب برای پوشش مشخص، فنر خطی برای اتصالات فولادی به فولاد مانند دسته‌ها و شیارها، و فنرهای غیرخطی برای همه اتصالات پوشش- اتصال‌دهنده- فولاد است (جدول 2 یک خلاصه و مرجع [11] جزئیات بیشتری را ارائه داده است). این مدل قادر به تولید ویژگی‌های کلیدی در واکنش هیستریزیت نیروی جابجایی در آزمایش دیوار برشی بدون کالیبراسیون بود. مدل منطقی قادر به پیش‌بینی قدرت حداکثر، و جابجایی قدرت حداکثر، و همچنین در هر چرخه و اتلاف انرژی در کل آن بود. این مدل، حالت شکست ساختار در خارج از اتصال‌دهنده‌ها - مثلاً در قوس دسته‌ها، شیارها، و یا نگه داشتن به حالت پایین، و نادیده گرفتن اثرات چرخش در عملکردهای پوشش یک طرفه، را جذب نمی‌کند. مدل ارائه شده تنها در صورتی معتبر است که باعث تسریع در شکست اتصال‌دهنده‌های گردد.

در این مدل اساساً تمام واکنش‌های غیرخطی از مدل اتصال، استخراج شده است و در نتیجه مدل مبتنی بر اتصال‌دهنده برای دیوار برشی معرفی شده است. این مدل دارای یک مزیت مهم در کار بر روی دیوار برشی حاوی فریم چوب است (به‌عنوان مثال، به مرجع [11] مراجعه کنید) و برای توصیف واکنش دیوارهای برشی حاوی فریم

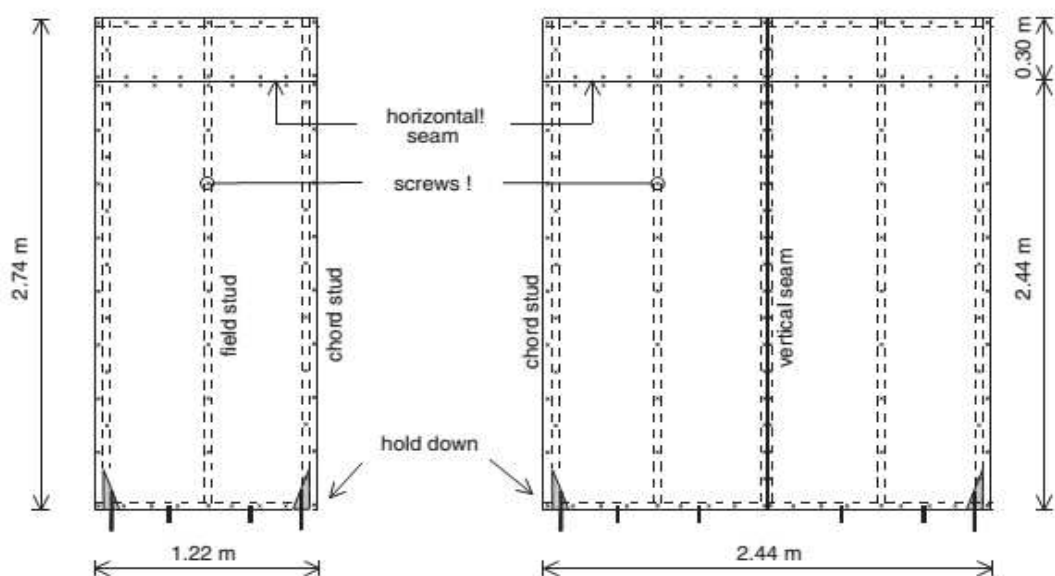
CFS در مدل ساختمان‌های بزرگتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [15,16]. مدل ممکن است شامل یا بدون عملکرد دیوارهای برشی نگه دارنده که وابسته به اندازه‌گیری در مقایسه با هدف مدل است، باشد. اگر مدل شامل غیرخطی نگه‌دارنده و حاوی پتانسیل برای انتقال مبتنی بر تحمل بار در زمینه قوس دسته‌ها باشد، نشان داده شده است که دارای اهمیت است [15,16].

دسته‌های فولادی با استفاده از عناصر سطر و ستون، مبتنی بر جابجایی مدل شده است و خواص سطح مقطع واقعی به عناصر اختصاص پیدا کرده است. دسته‌ها به شیارهای بالا و پایین حاوی عناصر چرخشی فتر متصل می‌شوند. سختی چرخشی برای عنصر فتر،  $11/3$  کیلونیوتون در متر بر رادیان، براساس آزمایش ساده‌ی فریم CFS تخمین زده شده است [1]. نگه دارنده‌ها با توجه عناصر فتر تک محوری در جهت عمودی مدل شده‌اند. سختی تنش  $9/9$  کیلو نیوتون بر میلی‌متر [8] برای عناصر نگهدارنده مشخص شده است، و یک سختی متراکم 1000 بار بزرگ‌تر، به‌عنوان تنش برای شبیه‌سازی یک بنیان محکم انتخاب خواهد شد. الگوریتم کریلوف نیوتون به‌عنوان یک حلگر در نرم‌افزار OpenSees مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اتصال پوشش - اتصال‌دهنده - فولاد، با استفاده از مواد Pinching04 [17] در نرم‌افزار OpenSees مدل شده است و فتر شعاعی بدون طول مبتنی بر مدل اتصال‌دهنده‌ها است؛ Pinching04 مدل مواد هیسترتیک یک بعدی است که برای چهار بخش خطی برای واکنش یکنواخت استحکام آن به کار برده می‌شود. ماده همچنین اجازه می‌دهد تا تعیین پارامترهای تخلیه و بارگذاری مجدد انجام پذیرد تا کاربر فعال هر سطح تضعیف و سختی را بتواند، تعریف کند. همچنین پارامترهای خسارت برای تخریب سختی اضافی نیز در دسترس هستند، اما در این کار استفاده نمی‌شوند. پارامترهای Pinching04 براساس آزمایش‌های پترمن و شافر [12] تخمین زده شده‌اند و کاربرد آن در یک مفهوم قطعی، توسط بوناپان و همکاران به کار برده شد [11]. گسترش این مدل از حالت قطعی به تصادفی، موضوع بخش زیر است.

#### 4- خصوصیات خواص اتصال دهنده به عنوان متغیرهای تصادفی

واکنش برشی غیرخطی یک اتصال دهنده از طریق اتصال پوشش در فولاد، می تواند در آزمایش های جداگانه تعیین شود. انگیزه ی کار بر روی طراحی پوشش ها در مرجع [18] مطالعه شد و با استفاده از یک آزمایش کوچک توسط پاترمن و همکاران [12] اصلاح شد و برای تولید واکنش یکنواخت و چرخه ای از پوشش-اتصال دهنده-فولاد که سازگار با آزمایش دیوار برشی در [1] است، استفاده می گردد. دستگاه آزمایش شامل دو دسته سوزن استاندارد در آزمایش جهانی ماشین، اتصال دسته های حاوی پوشش، و در نهایت سیکل برای نتایج نمونه است. برای تقارن، دو اتصال دهنده بین پوشش و دسته و هر دو وجه پوشش و دسته قرار داده شده است. یک اتصال دهنده ی یکتا، قبل و بعد از آزمایش مورد توجه قرار گرفته است، نتایج برای یک آزمایش نمونه در شکل 5 ارائه شده است.



شکل 4: پیکربندی دو دیواره ی برشی، ارائه شده توسط لیو و همکاران برای آزمایش دیوارهای برشی CFS: 1/22

متر عرض و 2/44 متر عرض.

جدول 1: دیوارهای برشی انتخاب شده در آزمایش لیو و همکاران [1]



Test or model number	Size (m × m)	OSB sheathing	Gypsum sheathing	Ledger	Horizontal seam (mm)	Vertical seam (mm)	Tested strength (kN)
1	1.22 × 2.74	✓	-	✓	2438 up	-	21.82
2	1.22 × 2.74	✓	✓	✓	2438 up	-	22.43
3	1.22 × 2.74	✓	-	-	2438 up	-	18.65
4	1.22 × 2.74	✓	-	✓	2133 up	-	18.17
5	1.22 × 2.74	✓	-	-	2133 up	-	21.95
6	1.22 × 2.74	✓	-	-	2133 up	305 over	15.61
7	1.22 × 2.74	✓	-	-	2438 up	610 over	18.41
8	1.22 × 2.74	✓	-	-	2438 up	610 over	16.34
9	1.22 × 2.74	✓	-	-	1372 up	610 over	16.95
10	2.44 × 2.74	✓	-	✓	2438 up	-	38.77
11	2.44 × 2.74	✓	✓	✓	2438 up	-	47.30
12	2.44 × 2.74	✓	-	-	2438 up	-	37.55

توجه: در آزمایش شماره 7، یک دسته‌ی اضافی به اندازه‌ی 0/3 متر در یک طرف قرار دارد. برای جزئیات بیشتر به پژوهش لیو و همکاران [1] رجوع کنید.

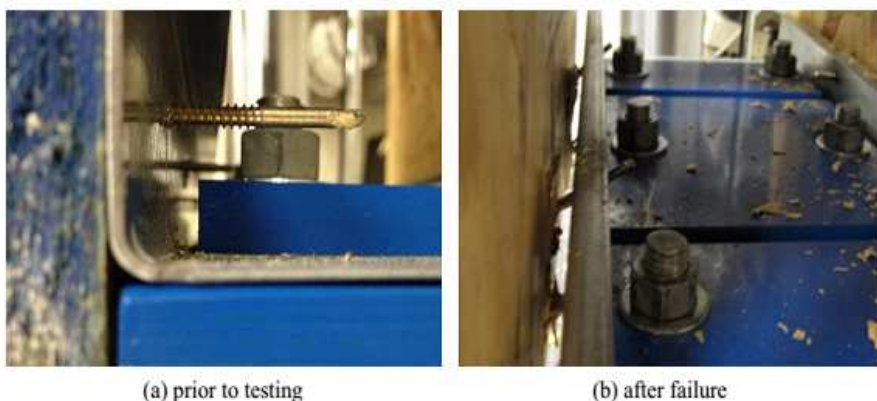
## جدول 2: خلاصه‌ای از مواد و عناصر استفاده شده در مدل‌های OpenSees

Component	Engineering designation	Element type	Element in OpenSees	Material in OpenSees
stud	600S162-54	Euler-Bernoulli beam	DispBeamColumn	linear elastic
track	600T150-54	Euler-Bernoulli beam	DispBeamColumn	linear elastic
strap	1 ½ in. × 54 mil	Euler-Bernoulli beam	DispBeamColumn	linear elastic
ledger track	1200T200-97	Euler-Bernoulli beam	DispBeamColumn	linear elastic
sheathing	Oriented Strand Board	Multi-Point constraint	RigidDiaphragm	-
sheathing fastener (wood-to-steel)	#8 or #10 flathead screw	Spring element	CoupledZeroLength	Pinching04
hold-down	Simpson S/HDU6	Spring element	Zero-length element	linear elastic
steel fastener (stud-to-track)	#10 flathead screw	Spring element	Rotational spring	Rotational stiffness at 11.3 kN-m/rad

## 1-4 داده‌های آزمایش اتصال‌دهنده و فرض منحنی استحکام آن

با در نظر گرفتن آزمایش مربوط در این زیرمجموعه‌ها، تجزیه و تحلیل در اینجا ارائه شده است، آزمایش‌های یکنواخت بر روی اتصال‌دهنده‌ی شماره 8 از طریق 11/1 میلی‌متر [7/16 اینچ] در پوشش OSB قرار گرفته و به 1/4 میلی‌متر [54 میلی‌لیتر = 0/054 اینچ] فولاد متصل شده و ظاهر آن در شکل 6 الف ارائه شده است. نتایج برای هر دو فاصله‌ی آزمایش اتصال‌دهنده شامل: 152/4 میلی‌متر (6 اینچ) و 304/8 میلی‌متر (12 اینچ) می‌گردد، پاترمن و همکاران نشان دادند که فاصله اتصال‌دهنده بر روی پاسخ برشی موضعی تاثیر نمی‌گذارد [12]. مدل مواد

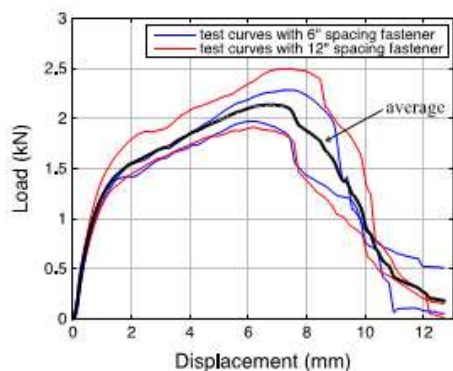
Pinching04, چهار بخش خطی را فراهم می‌کند که ممکن است در تقریب واکنش استحکامات مورد استفاده قرار بگیرد. مطابق با کارهای گذشته، استحکامات با استفاده از واکنش در حداکثر بار 40٪، حداکثر بار 80٪ به دست آمده و بار حداکثر و میانگین در بزرگترین جابجایی آزمایش شده در شکل 6 ب، تشریح گردیده است. مدل بعد از مقدار حداکثری در یکی از دو روش در نظر گرفته شده است: (الف) شکننده - واکنش به طور متوسط پس از مقدار حداکثری یا (ب) ایده‌آل - هادی - پس از حالت ایده‌آل هادی، واکنش به صورت مقدار حداکثری. این دو نوع در ادامه در شبیه‌سازی‌ها برای درک تأثیر رفتار اتصال‌دهنده پس از حالت حداکثری بر تغییرات واکنش دیوار برشی مورد استفاده قرار می‌گیرند.



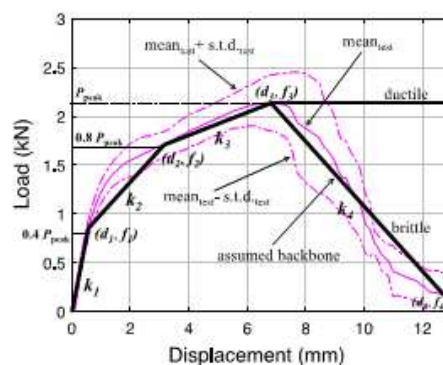
(a) prior to testing

(b) after failure

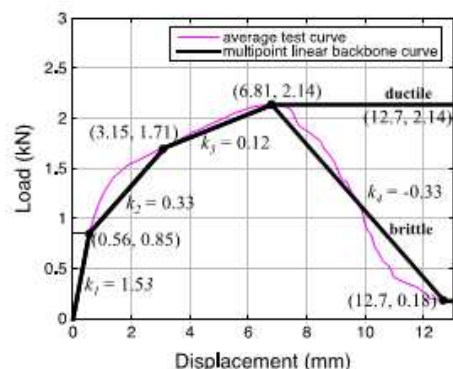
شکل 5: مشاهده‌ی مقیاس آزمایش دسته - اتصال‌دهنده - پوشش برای واکنش برش (پاترمن و همکاران [12])



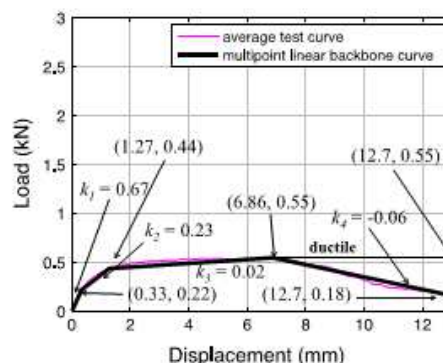
(a) example of fastener test curves



(b) conceptual Pinching04 fit to test data



(c) selected average fit from test data for 11.1 mm OSB sheathing and #8 screws to 54 mil steel



(d) selected average fit from test data for Gypsum board and #6 screws to 54 mil steel

**شکل 6:** ارتباط فولاد- اتصال دهنده- پوشش با استفاده از مدل واکنش استحکامات برش. (a) نمونه‌ی منحنی آزمایش اتصال دهنده، (b) مفهوم مناسب Pinching04 برای آزمون داده (c) محدوده‌ی انتخاب شده‌ی مناسب از داده‌های آزمون برای 11/1 میلی‌متر پوشش OSB و فولاد شماره 8 که به 54 میلی‌متصل است (d) محدوده‌ی انتخاب شده‌ی مناسب از داده‌های آزمون برای تخته‌ی گیپسوم و فولاد شماره 6 که به 54 میلی‌متصل است.

## 2-4 تولید استحکامات اتصال دهنده به صورت تصادفی

برای توسعه‌ی شبیه‌سازی‌های اتصال دهنده، نیروی حداکثری  $f_3$  به‌عنوان تنها متغیر تصادفی مستقل انتخاب شده است. تمام پارامترهای دیگر استحکامات، با وابستگی به قدرت پیک تولید می‌شوند، یعنی کاملاً با نیروی  $f_3$  همبستگی دارند. با استفاده از داده‌های آزمایشی برای اتصال دهنده‌ی شماره 8 در پوشش OSB 11/1 میلی‌متری و فولاد 1/4 میلی‌متری، تأثیر میانگین ( $\sigma_{f3}$ ) و انحراف استاندارد ( $\mu_{f3}$ ) بر قدرت اتصال دهنده به ترتیب 2/4 کیلو

نیوتون و 0/28 کیلو نیوتون به دست آمده است. بنابراین ضریب تنوع (C.O.V) در حداکثر قدرت اتصال دهنده  $(V_{f3}) = 0.28/2.14 = 13\%$  است.

نویسندگان تعداد زیادی، آزمایش‌های مشابه را برای اتصال دهنده‌ها انجام داده‌اند (اتصالات از طریق پوشش در ورق فولادی قرار گرفته و در برش به کار برده می‌شود) اما جزئیات دقیق (ضخامت فولاد، نوع اتصال دهنده، ضخامت پوشش) به منظور استفاده، در مرجع [10] معرفی شده است. قدرت حداکثری اتصال دهنده، به صورت ورودی تبدیل شده و پس از آزمون لیلیفورس (Lilliefors)، داده‌های تبدیل شده، به کار برده می‌شوند. نتایج مقدار  $P, 0/4278$  است، که خیلی بالاتر از آستانه‌ی معمولی مثل 0/05 برای یک حالت عادی است. بنابراین  $f_3$ ، به صورت غیرطبیعی فرض می‌گردد و  $40\% f_3$  و  $80\% f_3$  به ترتیب برابر با  $f_1$  و  $f_2$  تعریف می‌گردد. برای استحکامات اتصال دهنده‌ی شکننده،  $f_4$  برابر با 0/18 کیلو نیوتون تنظیم شده و در مدل هادی  $f_4$  برابر با  $f_3$  است. (قدرت نهایی فلات ثابت شده توسط  $f_4$ ، به طور کلی برای بهبود پایداری عددی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شبیه‌سازی‌های بعدی برای دیوارهای برشی هیچ یک از واکنش‌های مدل در رژیم نهایی فلات برای حداکثر قدرت دیوار برشی، وجود ندارد؛ هر چند که مرسوم است که در بخش نزولی قرار بگیرد). تمام سختی‌های متقاطع برای شاخه‌های مختلف در استحکامات اتصال دهنده‌ی تصادفی در منحنی ستون استحکامات چندگانه تعیین می‌شود. با استفاده از این فرض‌ها، می‌توان جابه جایی را به صورت  $d_1 = f_1 / k_1$ ,  $d_2 = d_1 + (f_2 - f_1) / k_2$ ,  $d_3 = d_2 + (f_3 - f_2) / k_3$  و  $d_4 = d_3 + (f_4 - f_3) / k_4$  برای اتصال دهنده‌ی شکننده و  $d_4 = 20 \text{ mm}$  برای حالت اتصال دهنده‌ی هادی است. پس از 20 میلی‌متر برای حالت هادی، فلات به سمت بی‌نهایت شدن، پیش خواهد رفت.

نتایج فرآیند برای ایجاد استحکامات تصادفی در شکل 7 نشان داده شده است. قدرت اوج به عنوان یک متغیر تصادفی منطقی، شبیه‌سازی شده و منحنی استحکامات اتصال دهنده‌ی، ایده‌آل و انعطاف‌پذیر، می‌توانند، به طور خودکار تولید شوند. این فرآیند نسبتاً ساده است - یک متغیر تصادفی یکتا وجود دارد و نتایج هرگز از حالت فضای اجباری عبور نمی‌کنند. با این حال، رفتار مشاهده شده در آزمایش و پراکندگی گسترده در واکنش بالقوه اتصال دهنده، این فرآیند را محدود می‌کند. استحکامات اتصال دهنده‌ی هادی و شکننده‌های تولید شده در بخش بعدی

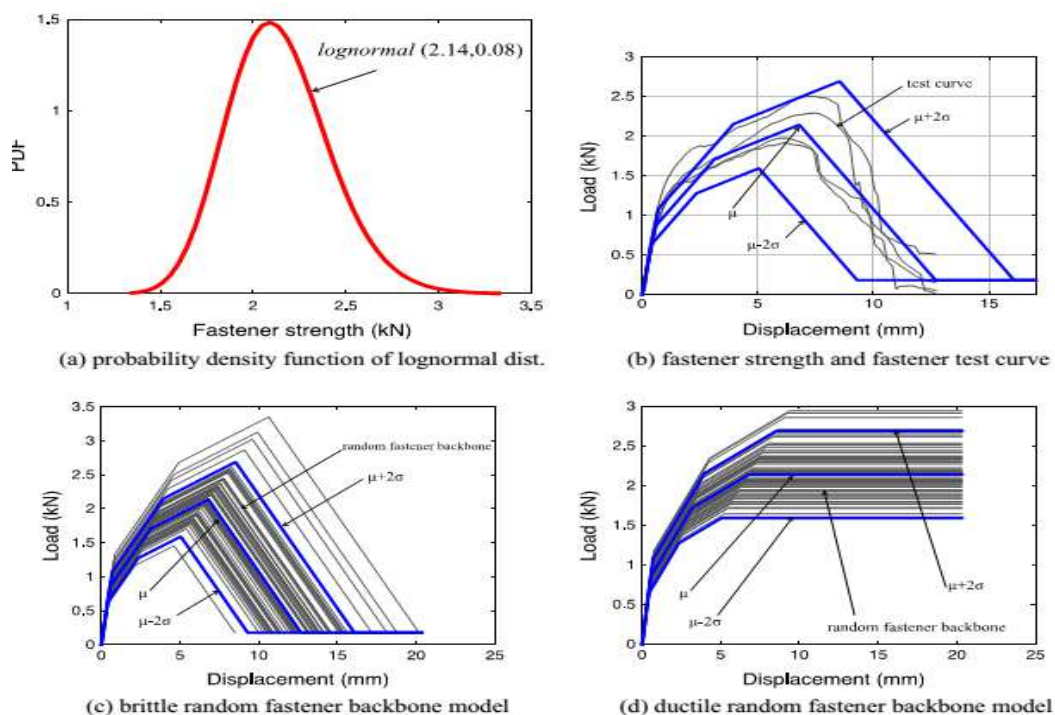
برای شبیه‌سازی MC در واکنش دیوار برشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استحکامات تصادفی مختلف برای اتصال دهنده‌های مختلف در دیوارهای برشی تولید شده و فرض می‌گردد که اتصال‌دهنده‌های نصب شده بر روی دیوارهای برشی به آن وابسته نیست.

### 5- شبیه‌سازی مونت کارلو در واکنش دیوار برشی فشاری

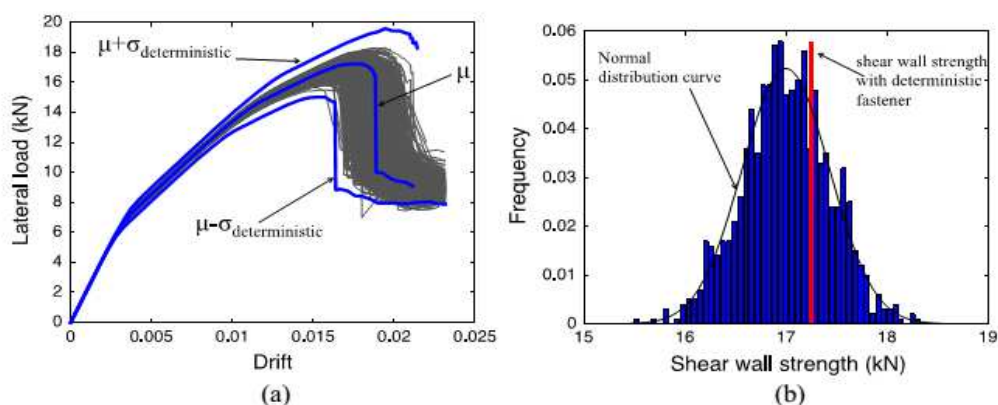
شبیه‌سازی MC یک روش نیرویی بی‌خرد برای مطالعه‌ی واکنش تصادفی یک سیستم است. مجموعه‌ای از مدل‌های قطعی براساس فرضیه‌های تصادفی در سیستم تولید می‌شوند. برای تعداد زیادی از نمونه‌ها، فرض می‌گردد که واکنش سیستم به سمت همگرا شدن به واکنش‌های احتمالی واقعی می‌رود. برای شبیه‌سازی‌های انجام شده در اینجا، دو لحظه اول قدرت اوج دیوار برشی (یعنی میانگین و واریانس قدرت دیوار برشی) مورد توجه هستند و پس از 1000 شبیه‌سازی، همگرایی اتفاق می‌افتد.

### 5-1 شبیه‌سازی مونت کارلو در دیوار برشی با استفاده از مدل اتصال‌دهنده‌ی شکننده

یک نمونه‌ی آزمایشی دیوار برشی معمولی (آزمایش 1c در [1]) برای انجام شبیه‌سازی MC انتخاب شد. ابعاد و جزئیات پیکربندی در جدول 1 ارائه شده است. برای این مطالعه، 1000 شبیه‌سازی فشاری با مدل دیوار برشی براساس اتصال‌دهنده انجام شد، در مدل استحکامات اتصال‌دهنده، 70 توزیع مستقل یکسان (iid) تصادفی (شکننده) به وجود خواهد آمد. به‌طور موثر، کشش در شبیه‌سازی MC دیوار، شامل 70 اتصال‌دهنده iid است و سپس یک تحلیل تحت فشار انجام شده و واکنش ثبت شده است. کشش دوم شامل یک اتصال‌دهنده‌ی جدید، 70 iid است، و این ادامه می‌یابد برای 1000 مجموع کشش، به طوری که بتوان، آمار شبیه‌سازی فشار را تخمین زد.



شکل 7: توزیع و استحکامات اتصال دهنده تصادفی برای مدل های هادی و شکننده (a) تابع چگالی احتمالی در محدوده منطقه ای (b) قدرت اتصال دهنده و منحنی آزمایش اتصال دهنده (c) مدل استحکامات اتصال دهنده تصادفی شکننده (d) مدل استحکامات اتصال دهنده تصادفی هادی

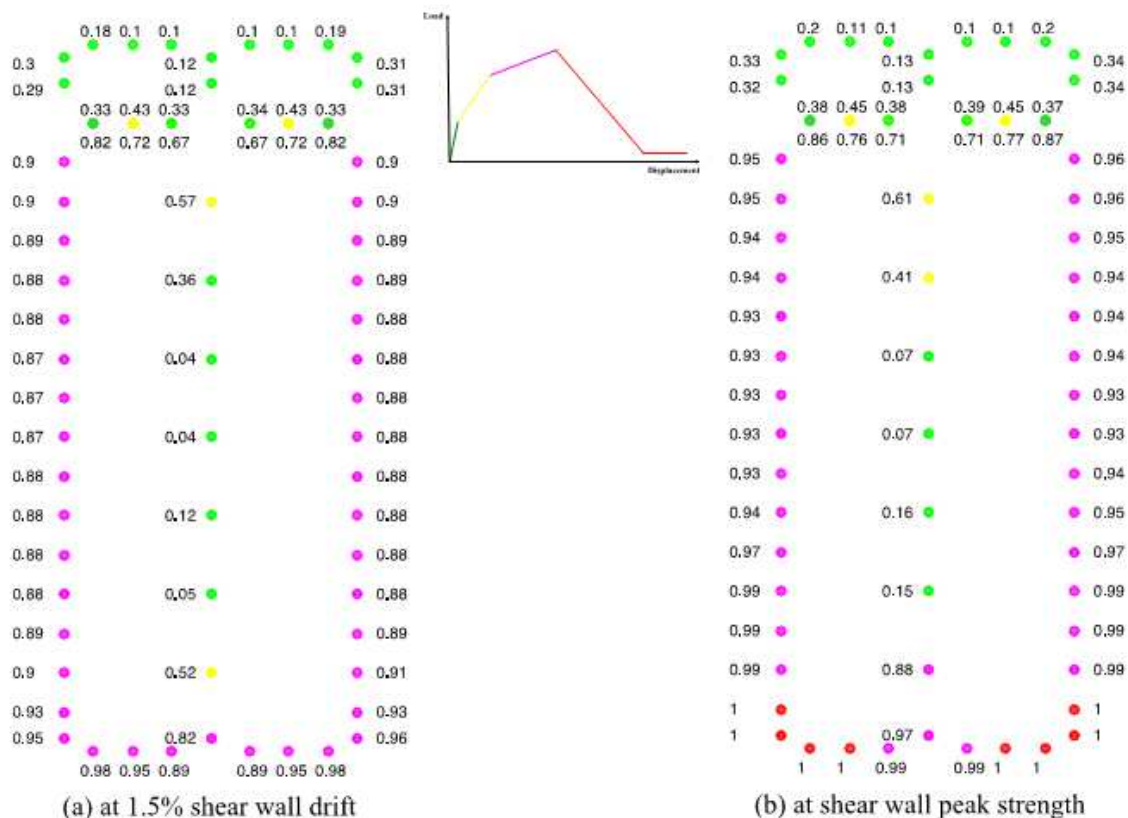


شکل 8: منحنی رانش دیوار برشی با 1000 عملیات و هیستوگرام آن با مدل اتصال دهنده شکننده.

منحنی جابجایی بار جانبی و قدرت اوج هیستوگرام به ترتیب در شکل 8 الف و ب نشان داده شده است. توجه داشته باشید که فرضیه‌ی اساسی مدل‌های مبتنی بر اتصال‌دهنده، سختی اولیه‌ی ثابت است، در نتیجه هر 1000 شبیه‌سازی با همان سختی قطعی اولیه، آغاز می‌شود. برای ارائه‌ی یک مقایسه، سه مدل قطعی دیگر نیز پردازش شد: (الف) کلیه‌ی اتصالات، واکنشی برای میانگین ( $\mu$ ) استحکامات داده شده است، (ب) تمام اتصال‌دهنده‌ها، یک واکنش استحکام  $\mu + 1$  را برای انحراف معیار ( $\sigma$ ) ارائه داده‌اند، و (ج) کلیه‌ی اتصال‌دهنده‌ها یک واکنش استحکامات اتصال‌دهنده‌ی  $\mu - \sigma$  را به وجود می‌آورند. جالب توجه است که واکنش دیوار برشی در مرزها نیز وجود دارد. در حقیقت، حتی اگر CoV قدرت اتصال‌دهنده 13٪ است، CoV قدرت اوج دیوار برشی کمتر از 3٪ است. این کاهش تنوع خود نیز مفید است و نشان می‌دهد که توزیع مجدد بار در درون اتصال‌دهنده‌ها تحت بار دیوار برشی است؛ با این حال، لازم به ذکر است که متوسط قدرت دیوار برشی، 16/9 کیلو نیوتون است و در مقایسه با نتایج مدل قطعی، 17/2 کیلو نیوتون در حالت مواد متوسط، نشان می‌دهد که همه اثرات سیستم سودمند نیستند. بنابراین، طراحی با استفاده از ویژگی‌های اتصال‌دهنده به پیش‌بینی میانگین مقاومت دیوار برشی می‌انجامد که به میزان قابل توجهی بیش از قدرت متوسط دیوار برشی تخمین زده می‌شود.

استفاده از اتصال‌دهنده‌ها در دیوار برشی ممکن است سبب اندازه‌گیری نسبت تقاضا به ظرفیت (DC) شود. برای هر اتصال‌دهنده در دیوار برشی، نسبت DC به‌عنوان نسبت نیروی اتصال‌دهنده در قدرت اوج دیوار برشی به ظرفیت اتصال‌دهنده در هر قدرت اتصال به صورت نمونه‌ی منحصر به فرد (به‌عنوان مثال هر حالت منحصر به فرد  $f_3$ ) تعریف می‌گردد. نسبت متوسط DC برای هر اتصال‌دهنده براساس 1000 شبیه‌سازی MC در رانش دیواره 1/5٪ و در قدرت اوج دیوار برشی به ترتیب در شکل 9 الف و ب ارائه شده است.





شکل 9: میانگین نسبت ظرفیت به تقاضا در اتصال دهنده‌ی دیوار برشی (a) در 1/5٪ رانش دیوار برشی (b) در قدرت

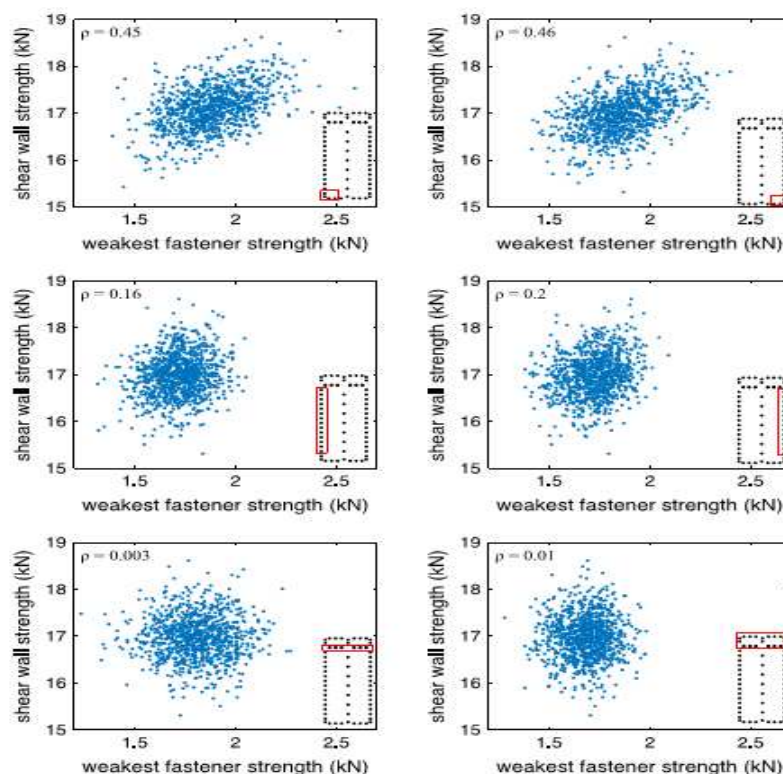
### حداکثر دیوار برشی

اتصال دهنده‌ها در گوشه‌های پایین دارای بالاترین نسبت DC، با نزدیک شدن به 1/0 حتی قبل از اینکه قدرت دیواره به نقطه اوج برسد، هستند. در قدرت حداکثر، چندین اتصال دهنده در پایین در محدوده‌ی واکنش پس از اوج وجود دارند. اتصال دهنده‌ها در بخش بالای دیوار برشی به دلیل استفاده از فریم سنگی زیاد مورد استفاده قرار نمی‌گیرند؛ در بالای دیوار برشی یک فریم خمشی قابل توجه ایجاد می‌شود که مقاومت اتصال دهنده‌ها را افزایش می‌دهد.

در دیوارهای برشی، اتصال دهنده‌ها به عنوان یک گروه کار می‌کنند. خرابی اتصال دهنده یا تخریب سختی اتصال دهنده، با نزدیک شدن اتصال دهنده‌های همسایه کاهش پیدا می‌کند که می‌توانند نیروی اضافی را حمل کنند. برای بررسی اثرات این گروه اتصال دهنده‌ها، ما اتصال دهنده‌ها را به گروه‌هایی تقسیم می‌کنیم، و ضریب ارتباط را



برای قدرت ضعیف‌ترین اتصال‌دهنده و قدرت دیوار برشی مقایسه می‌کنیم. اتصال‌دهنده‌ها در همان محل، و با نسبت های DC مشابه به یک گروه اتصال‌دهنده تقسیم می‌شوند. شکل 10 a-f، نشان دهنده ضریب ارتباط برای شش گروه اتصال‌دهنده انتخاب شده است. در گوشه پایین دیوار برشی ضریب ارتباط، 0/45 است در حالی که فقط 0/003 برای گروه اتصال‌دهنده در محل اتصال افقی وجود دارد. شکست یک اتصال‌دهنده یکتا با شکست یک دیوار برشی برابر نیست، اما شکست اتصال‌دهنده در پایین مکان مهم‌تر از مکان‌های دیگر است. شکل 10 یک معنی را برای درک اهمیت نسبی محل اتصال‌دهنده در یک دیوار برشی معمولی فراهم می‌کند.

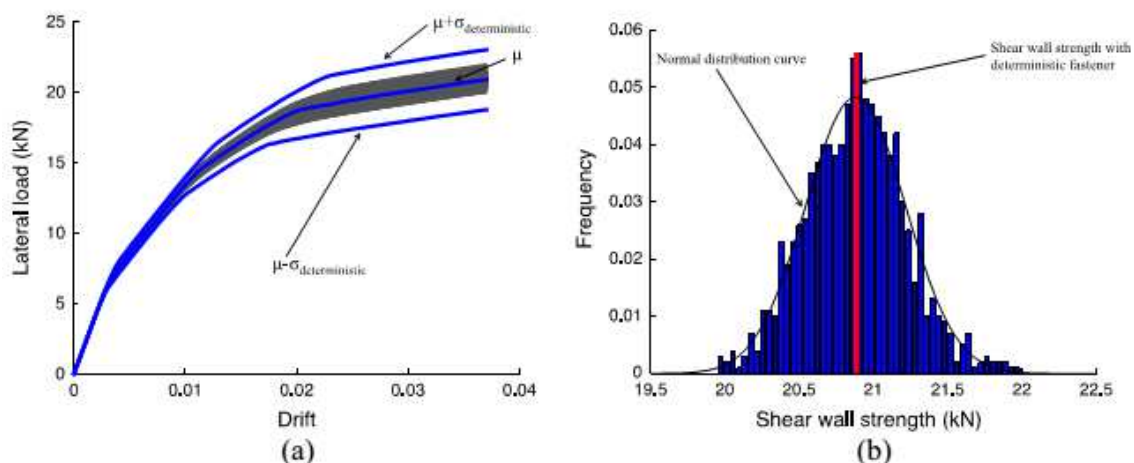


شکل 10: ضریب ارتباط بین قدرت دیوار برشی و گروه‌های اتصال‌دهنده در قدرت حداکثر برای مدل‌های دیوار

برشی شکننده

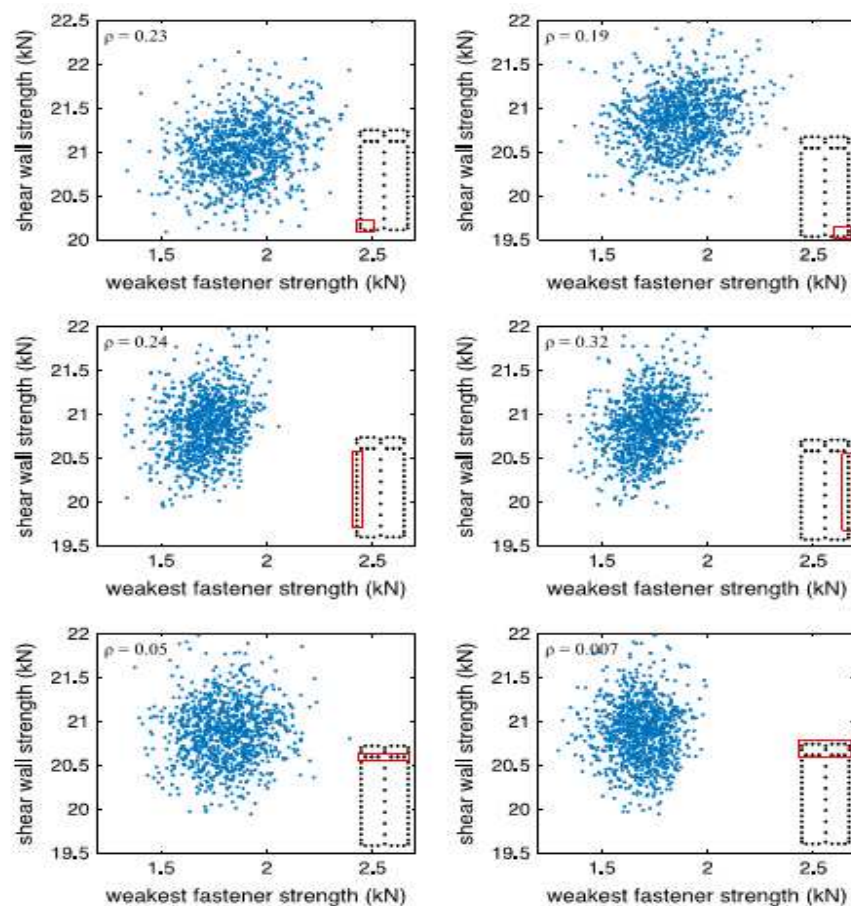
5-2 شبیه‌سازی مونت کارلو در دیوار برشی با استفاده از مدل اتصال‌دهنده ورقه‌ای

در حالت ایده آل اتصال دهنده ها یک واکنش کاملاً انعطاف پذیر داشته و بنابراین اتصال دهنده های ضعیف تر می توانند همیشه به اتصالات قوی تر تبدیل شوند. برای درک تاثیر این مورد ایده آل، شبیه سازی MC نیز با استفاده از مدل اتصال دهنده ی تکمیلی انجام شده است. 1000 شبیه سازی برای دیوار برشی شماره 1 انجام شده است و نتایج در اینجا خلاصه شده است. بر خلاف شبیه سازی اتصال دهنده های شکننده، بار پیک تنها هنگامی اتفاق می افتد که هر اتصال دهنده تولید شود و این امر منجر به ریزش دیوارهای غیرواقعی می شود، بنابراین حداکثر 101/6 میلی متر [4 اینچ] یا 3/7٪ رانش مجاز است. این رانش با حداکثر رانش مشاهده شده در آزمایشات مربوطه سازگار است (به عنوان مثال، پژوهش [1] را ببینید). پاسخ جابه جایی برشی و هیستوگرام قدرت پیک در رانش 3/7٪ در شکل 11 ارائه شده است. مدل های قطعی با اتصال دهنده های ورودی در  $\mu$  و  $\mu \pm \sigma$  برای مقایسه دوباره ارائه می شوند. همانطور که قبلاً، تغییرات پیک دیوار برشی (CoV در 3٪) بسیار کمتر از تغییرات ورودی پیک کشش اتصال دهنده (CoV در 13٪) بود؛ با این حال، این بار در مدل کاملاً تکمیلی، متوسط قدرت دیوار برابر یک مدل قطعی براساس قدرت اتصال دهنده است. همانطور که انتظار می رود، هیچ اثر مضر در مورد پاسخ اتصال دهنده کاملاً تکمیلی مشاهده نمی شود.



شکل 11: منحنی بار رانشی دیوار برشی با 1000 عملیات و هیستوگرام آن با مدل اتصال دهنده ی ورقه ای.

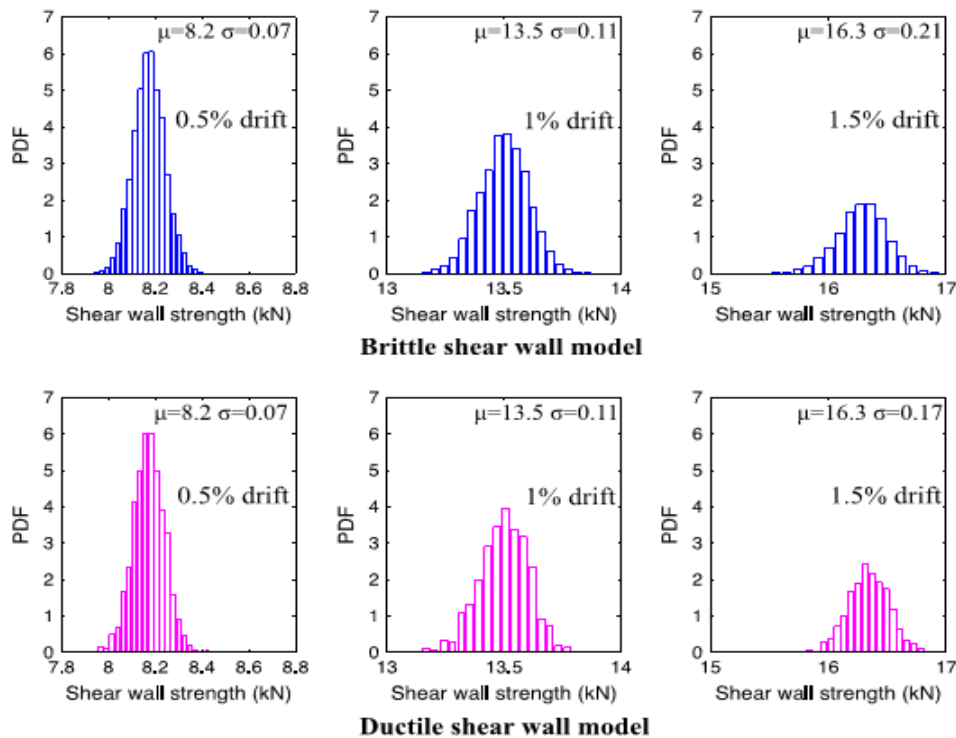
همبستگی بین ضعیف‌ترین اتصال‌دهنده‌ی در یک گروه انتخاب شده و قدرت پیک دیوار برشی برای مدل تکمیلی در شکل 12 ارائه شده است. در مقایسه با نتایج مدل شکننده، این مدل، همبستگی پایینی را برای آن اتصال‌دهنده‌ها که DC نسبتاً بالای دارند، نشان می‌دهد. این سازگاری کامل در مورد اتصال‌دهنده‌های عایق‌بندی شده مجاز است. از آنجا که اتصال‌دهنده‌ی دارای رفتار ورقه‌ای است، حتی اتصال‌دهنده‌های ضعیف می‌توانند به‌طور نامحدود حمل نیرو را داشته باشند و اجازه می‌دهد توزیع مجدد بار انجام دهند. این تسهیل مجدد باعث می‌شود محل اتصال‌دهنده با همبستگی کمتر نسبت به قدرت دیوار برشی ایجاد شود.



شکل 12: ضریب ارتباط بین قدرت دیوار برشی و گروه‌های اتصال‌دهنده در قدرت حداکثر برای مدل‌های دیوار

برشی ورقه‌ای

شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تغییرات در رانش افزایش می‌یابد (به‌عنوان مثال، شکل 8a). برای بررسی این موضوع، هیستوگرام‌های قدرت دیوار برشی در 0/5، 1/0 و 1/5 درصد دیوار رانشی در شکل 13 ارائه شده است. انحراف استاندارد قدرت از 1٪ کمتر و تقریباً تا 2٪ در محدوده‌ی رانش مورد مطالعه، افزایش می‌یابد و مدل اتصال‌دهنده تغییرات کمی دارد. با این حال، قدر مطلق متغیر کوچک است ( حداکثر واریانس  $0.04 \text{ kN}^2$ ).



شکل 13: هیستوگرام قدرت دیوار برشی تحت رانش‌های مختلف.

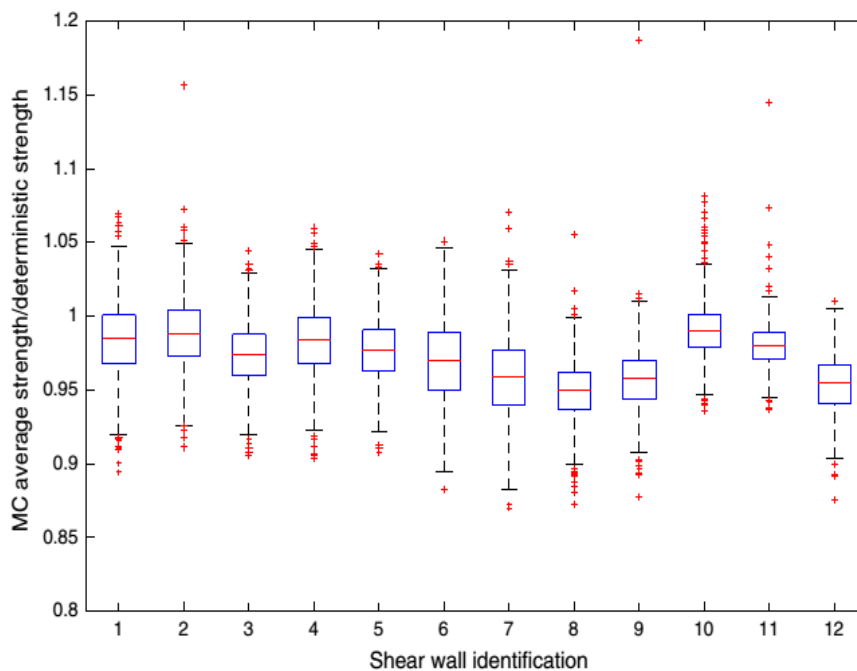
جدول 3: پیش‌بینی قدرت پیک برای تمام پیکربندی‌های انتخابی دیوار برشی.

Model No.	MC simulation			Deterministic		Experiment	
	$\mu_{MC}$ (kN)	$\sigma_{MC}$ (kN)	$V_{MC}$ ( $\sigma/\mu$ )	$F_{Det}$ (kN)	$\mu_{MC}/F_{Det}$	$F_{Test}$ (kN)	$\mu_{MC}/F_{Test}$
1	17.22	0.456	2.65%	17.49	0.98	21.82	0.79
2	22.05	0.516	2.34%	22.31	0.99	22.43	0.98
3	16.55	0.369	2.23%	16.99	0.97	18.65	0.89
4	17.55	0.425	2.42%	17.84	0.98	18.17	0.97
5	16.78	0.364	2.17%	17.18	0.98	21.95	0.76
6	12.65	0.364	2.88%	13.05	0.97	15.61	0.81
7	15.11	0.449	2.97%	15.76	0.96	18.41	0.82
8	15.90	0.347	2.18%	16.76	0.95	16.34	0.97
9	16.62	0.377	2.27%	17.37	0.96	16.95	0.98
10	37.20	0.710	1.91%	37.56	0.99	38.77	0.96
11	45.81	0.725	1.58%	46.78	0.98	47.30	0.97
12	33.24	0.681	2.05%	34.84	0.95	37.55	0.89
		average:	2.30%		0.97		0.90

### 5-3 نتایج آماری برای تمام تنظیمات دیوار برشی مورد مطالعه

آزمایش‌های دقیق در بخش 2 (شکل 4 و جدول 1)، طیف وسیعی از ساختار دیوار برشی را پوشش می‌دهد که با شرایط مورد استفاده در نمونه‌ی اولیه دو قاب فولادی سرد، شکل گرفته است (به پژوهش سکافر و همکاران [13] رجوع کنید) در این بخش شبیه‌سازی MC به تمام دوازده پیکربندی دیوار برشی گزارش شده در بخش 2 اعمال خواهد شد. مدل دیوار برشی با اتصالات شکننده در تمام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

برای هر پیکربندی دیوار برشی، شبیه‌سازی مونت کارلو انجام گرفته است. میانگین ( $\mu_{MC}$ )، انحراف معیار ( $\sigma_{MC}$ ) و  $CoV$  ( $V_{MC}$ ) برای قدرت پیک حاصل از شبیه‌سازی‌ها در جدول 3 گزارش شده است. علاوه بر این، میانگین قدرت پیک حاصل از شبیه‌سازی MC با قدرت پیک براساس تجزیه و تحلیل قطب مثبت جزیی با استفاده از خواص مرکب اتصال‌دهنده ( $F_{Det}$ ) در جدول 3 ارائه شده است. استحکام دیوار برشی تست شده نیز در جدول ذکر شده است و با مقاومت مرکزی MC مقایسه است. در تمام پیکربندی‌ها  $\mu_{MC} < F_{Det}$  است که نشان می‌شود که استحکام متوسط سیستم کمی پایین‌تر از قدرت مورد انتظار براساس استحکام مرکزی است. این حالت نشان دهنده‌ی یک سیستم سری است؛ اما نسبت تنها کمی کمتر از 1/0 است (میانگین 0/97 است) بنابراین اثر سیستم بر قدرت متوسط تنها منفی خواهد بود. قدرت دیوار برشی حاصل از شبیه‌سازی تقریباً مشابه به قدرت نتایج تجربی است. دیوارها با پیش‌بینی شبیه‌سازی بیشتر محافظه‌کارانه، عموماً تعداد بیشتری از تخته‌های پوشش دهنده و درزها و تماس بین تخته‌ها را در مدل توسعه یافته اتخاذ کرده‌اند. برای بحث بیشتر به مرجع [11] مراجعه کنید.



شکل 14: نمودار جعبه و ویسکر دیوار برشی در شبیه‌سازی قدرت مونت کارلو به نسبت قطر دیوار برشی.

جدول 4: شاخص قابلیت اطمینان و ضریب مقاومت دیوارهای برشی شبیه‌سازی شده.

Model no.	$\beta$ when $\phi = 0.6$	$\phi$ when $\beta = 2.5$	$\phi$ when $\beta = 3.5$
1	4.39	0.896	0.725
2	4.40	0.897	0.726
3	4.40	0.897	0.726
4	4.40	0.897	0.726
5	4.41	0.897	0.726
6	4.39	0.895	0.724
7	4.39	0.895	0.724
8	4.41	0.897	0.726
9	4.40	0.897	0.726
10	4.41	0.898	0.727
11	4.42	0.898	0.728
12	4.41	0.898	0.727
mean	4.40	0.90	0.73

پراکندگی نتایج در 12 آزمایش مورد مطالعه در نمودار جعبه و ویسکر در شکل 14 نشان داده شده است. نتایج

مجدداً توسط  $F_{Det}$  نشان داده شده است. مقادیر میانگین اندکی کمتر از 1/0 است و پراکندگی همواره کوچک است.

متوسط  $CoV$  در حداکثر قدرت دیوار برشی برای دیوارهای برش مورد مطالعه 2/3٪ و حداکثر  $CoV$  نیز 3٪ است

که به طور قابل توجهی کمتر از CoV اتصال استحکام دهنده است که 13٪ می باشد. با توجه به تغییرپذیری، اثر سیستم در یک دیوار برشی بسیار سودمند است.

## 6- قابلیت اطمینان دیوارهای برشی شبیه سازی شده

اولین دستور برای شاخص قابلیت اطمینان دومین حرکت به صورت زیر بیان می شود:

$$\beta = \frac{\ln(R_m/Q_m)}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \quad (1)$$

که در آن  $R_m$  متوسط مقاومت،  $V_R$  ضریب تغییر (CoV) مقاومت،  $Q_m$  تقاضای متوسط، و  $V_Q$  تقاضای CoV است. استاندارد AISI برای طراحی فولاد سرد، از جمله استandar دی که بر روی دیوارهای برشی فولادی نورد سرد شده (AISI 5400-15)، برای طراحی لرزش و ضریب مقاومت (LRFD) کاربرد دارد که جزئیات آن در استاندارد AISI 5100-16 تفسیر شده است. برای LRFD، استحکام طراحی ( $\phi R_n$ ) باید بیشتر از هر ترکیب بارگذاری ( $\gamma_i \phi_i$ ) در نظر گرفته شود، که در آن،  $i$  خلاصه ای از انواع مختلف بارگذاری (مرده، زنده، باد و غیره) را ارائه می دهد.

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (2)$$

همانطور که در مرجع [19] توضیح داده شده است، جایگزینی معادله (2) به (1) برآوردهای مختلف را برای  $\beta$  بسته به مجموعه بار انتخاب شده و نسبت بارهای مختلف ( $Q_i/S$ ) به یکدیگر فراهم می کند. با این وجود، استاندارد AISI 5100-16، ترکیبی از بار منفرد و نسبت بارگذاری را برای کالیبراسیون LRFD اتخاذ کرده است؛ این نتیجه در تقریبی سازگار در حالت های مختلف محدود است، هر چند محدودیت های مفهومی به طور کامل در مرجع [19] مورد بحث قرار گرفته است. اگر فرض کنیم مقاومت اسمی،  $R_m$  برابر است با مقاومت متوسط از شبیه سازی MC و با استفاده از بارهای ترکیبی و نسبت بارهای ضمنی در AISI 5100، قابلیت اطمینان به صورت زیر ساده می شود:

$$\beta = \frac{\ln(1.521/\phi)}{\sqrt{V_R^2 + 0.21^2}} \quad (3)$$

یا، برای یک  $\beta$  شناخته شده، ضریب مقاومت می‌تواند به‌عنوان رابطه زیر شناخته شود:

$$\phi = 1.521e^{-\beta\sqrt{V_R^2 + 0.21^2}} \quad (4)$$

(توجه داشته باشید که قبلاً ضریب مقاومت 1/521 برای استاندارد AISI S100-16 در معادله‌ی C-B3.2.2-141201 بود که در مرجع [20] قابل مشاهده است).

برای این سناریو، CoV مقاومت رانشی قابلیت اطمینان را ارزیابی می‌کند. مقدار CoV در جدول 3، مقادیر  $V_R$  را برای 12 دیوار شبیه‌سازی شده ( $V_{MC}$ ) ارائه می‌دهد. در حال حاضر، AISI 5400-15 با استفاده از  $\phi = 6$  و  $\beta$  فرض شده در جدول 4 ارائه شده است. علاوه بر این  $\beta$  هدف برای استانداردهای AISI برای اعضا 2/5 و برای اتصالات 3/5 است. مقدار  $\phi$  حاصل از نتایج این  $\beta$  هدف نیز در جدول 4 آمده است.

براساس دیوارهای برشی شبیه‌سازی شده، قابلیت اطمینان حاصل از یک طراحی با استفاده از میانگین نتایج شبیه سازی MC برای قدرت اسمی و عامل  $\phi$  در استاندارد AISI 5400-15 0 برای دیوارهای برشی قابل توجه است و بیش از میزان اطمینان هدف است (میانگین  $\beta = 4/4$ ). اگر متغیرهای هدف سنتی اجرا شوند (2/5 یا 3/5) بالاتر از عامل  $\phi$  می‌تواند به‌دست آید. این نتایج یک دامنه‌ی محدود را پوشش می‌دهد و تمرکز بر استفاده مستقیم از نتایج شبیه‌سازی است. در طراحی، روش‌های ساده‌تر معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بخش زیر چندین روش طراحی بالقوه را برای دیوارهای برش حاوی فریم CFS و پوشش OSB معرفی می‌کند و سپس قابلیت اطمینان آنها را در 12 آزمون انتخابی بررسی می‌کند.

## 7- روش‌های طراحی دیوارهای برشی حاوی پوشش OSB



براساس مشخصات طراحی فعلی و روش شبیه‌سازی ما، چهار روش طراحی در زیر برای بررسی مقاومت دیوار برشی فولادی مورد سرد شده، مطرح شده است.

روش 1: روش مشخصه‌ی فعلی. در AISI 5400-15 (قبلا AISI S213-12) قدرت دیوار برشی حاوی فریم CFS با انواع پوشش‌های مختلف اعمال شده، ارائه شده است. این روش براساس آزمایش مستقیم انجام می‌شود (مستقل از آنهایی که برای ارزیابی قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرند) و در درجه اول ضخامت ورق فولاد، ضخامت و نوع پوشش و فاصله اتصال‌دهنده را در نظر می‌گیرد. نسبت ابعاد دیوار برای دیوارهای برشی باریک نیز در نظر گرفته شده است. استحکام دیواره در طول واحد دیوار به‌طور مستقیم از یک جدول در AISI S400-15 استخراج شده است و بار دامنه در طول دیوار برای رسیدن به ظرفیت برش، فعال خواهد شد.

روش 2: (الاستیک) روش شکست اتصال‌دهنده‌ی نخستین. در بیشتر سیستم‌های ساختاری، روشی برای طراحی متعارف، انجام تجزیه و تحلیل الاستیک خطی و سپس مقیاس نتایج (محوری، برشی و تقاضای لحظه‌ای) به شکست اولین عضو و یا اتصال و ایجاد قدرت در سیستم است. در اینجا از مدل‌های مبتنی بر اتصال‌دهنده‌ی، بوئونپین و همکاران [11] استفاده می‌شود، این روش می‌تواند به راحتی انجام شود. یک مدل الاستیک خطی دیوار برشی تکمیل شده است و نتایج به‌صورت خطی مقیاس می‌شوند تا تقاضای پیک اتصال‌دهنده برابر با ظرفیت متوسط اتصال باشد و این امر برای ایجاد مقاومت دیوار برشی کامل استفاده می‌شود. شبیه‌سازی خطی و قطعی است و روش ساده‌ای را با طراحی ساختاری متعارف فراهم می‌کند.

روش 3: روش شبیه‌سازی دقیق. اگر شبیه‌سازی یکسان براساس پاسخ استحکام متوسط اتصال‌دهنده برای تمام اتصال‌دهنده‌ها استفاده شود؛ سپس یک تحلیل غیرخطی استاتیکی باریک می‌تواند با مدل دیوار برشی مبتنی بر اتصال‌دهنده ایجاد شود. مدل حاصل اجازه می‌دهد تا توزیع دوباره ایجاد شود، اما چشم‌پوشی از اثرات سیستم (منفی و یا مضر) به علت تغییر در ظرفیت اتصال، رخ خواهد داد. شبیه‌سازی‌ها غیرخطی هستند، اما قطعی هستند و یک تقریب واقع‌بینانه برای یک ابزار محاسباتی مهندسان می‌باشند، که می‌توانند استفاده کنند.

روش 4: روش شبیه‌سازی مونت کارلو. اگر رویکرد این مقاله دنبال شود و پاسخ استحکامات اتصال‌دهنده به وسیله یک متغیر تصادفی مشخص شود، سپس شبیه‌سازی متغیر تصادفی می‌تواند برای تولید پاسخ اتصال‌دهنده‌ی تصادفی استفاده شود، که سپس برای اتصال‌های مختلف در دیوار برشی شبیه‌سازی می‌شود. این شبیه‌سازی MC اجازه می‌دهد که توزیع مجدد برای تغییرات تصادفی در پاسخ سیستم ایجاد شود. این رویکرد، قوی‌ترین روش برای یک روش طراحی در نظر گرفته شده در اینجا است، اما نیاز به تعداد زیادی از تجزیه و تحلیل‌ها توسط مهندس دارد و در نتیجه بعید است که در طراحی فعلی مورد استفاده قرار گیرد.

#### 8- قابلیت اطمینان روش‌های طراحی بر روی آزمون‌های انتخاب شده

در فرمول‌بندی سنتی قابلیت اطمینان LRFD، مقاومت متوسط ( $R_m$ ) به مقاومت پیش‌بینی شده‌ی اسمی ( $R_n$ ) به صورت زیر ارتباط پیدا خواهد کرد:

$$R_m = P_m M_m F_m R_n \quad (5)$$

که در رابطه‌ی فوق؛  $P$ ،  $M$  و  $F$  متغیرهای تصادفی غیرواقعی هستند که بیانگر مورب بودن در روش پیش‌بینی هستند (به عنوان مثال؛  $P$  فاکتور حرفه ای که با نسبت‌های پیش‌بینی شده در آزمون پیش‌بینی حاصل می‌شود) و همچنین مورب بودن به دلیل خواص مواد ( $M$ ) و ساختار ساخت یا اتصالات در نظر گرفته شده است ( $F$ ). زیر شاخص  $m$  به مقادیر متوسط  $P$ ،  $M$  و  $F$  اشاره دارد؛  $CoV$  مقاومت،  $V_R$  توسط رابطه‌ی زیر تقریب زده می‌شود [20]:

$$V_R = \sqrt{V_M^2 + V_F^2 + V_P^2} \quad (6)$$

که در رابطه‌ی فوق؛  $V_M$ ،  $V_F$  و  $V_P$  به ترتیب مواد اولیه، ساخت، و عامل حرفه‌ای را در اختیار می‌گذارد. با جایگزینی معادله (2)، (5) و (6) به معادله (1) و دوباره با استفاده از بارهای ترکیبی و نسبت بار ضمنی در کالیبراسیون استاندارد AISI 5100 LRFD، شاخص اطمینان می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\beta = \frac{\ln(1.521P_m M_m F_m / \phi)}{\sqrt{V_M^2 + V_F^2 + V_P^2 + 0.21^2}} \quad (7)$$

چهار روش طراحی، چهار پیش‌بینی برای  $P$  را ایجاد کرده است، یعنی چهار میانگین  $(P_m)$  و  $CoV$   $(V_P)$  نسبت به آزمون پیش‌بینی شده ایجاد شده است. متغیرهای باقیمانده‌ی تصادفی  $M$  و  $F$  در دو روش مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند: (الف) برای راهنمایی در AISI 5100-16 فصل  $K$ ، و (ب) از شبیه‌سازی  $MC$  که در اینجا ارائه شده، اطلاعات کسب گردد. بنابراین، برای (الف) در هر AISI 5100-16 و با فرض اتصال به کنترل مقاومت چوب،  $M_m$   $= 1.0$ ،  $V_M = 0.15$  و  $F_m = 1.0$  و  $V_F = 0.15$  خواهد بود.

به‌طور کلی، تغییرات در  $M$  و  $F$  در نظر گرفته شده است تا منعکس‌کننده‌ی تغییرات ذاتی در مواد و کیفیت تولید باشد و مستقل از تغییر در روش پیش‌بینی باشد. برای یک دیوار برشی حاوی فریم  $CFS$  و پوشش  $OSB$ ، این تغییر توسط پوشش  $OSB$  به فولاد در حالت محدود منتقل می‌شود. شبیه‌سازی  $MC$  انجام شده در اینجا، تخمینی از تنوع سیستم دیوار برشی را ارائه می‌دهد و در جدول 3 متوسط  $V_{MC} = 2.3\%$  خواهد بود. توجه داشته باشید که متغیر ورودی حداکثر قدرت کانکتور دارای  $13\%$   $CoV$  است؛ با این حال، این تغییرپذیری اتصال‌دهنده منجر به تغییرات سیستم بالا نمی‌شود؛ زیرا مجدداً بارگذاری در میان اتصال‌دهنده‌ها رخ می‌دهد. بنابراین برای (ب) فرض کنیم که  $M_m = 1.0$ ،  $F_m = 1.0$  در مرجع [20] و  $(V_{MC})^2 = (V_M)^2 + (V_F)^2$  خواهد بود. شبیه‌سازی  $MC$  برآورد تغییرات سیستم را نیز فراهم می‌کند، که این استفاده کمتر از متغیرهای اتصال است و بر پیش‌بینی قابلیت اطمینان تأثیر می‌گذارد.

شاخص قابلیت اطمینان  $\beta$  در استاندارد فعلی AISI S400-15 مقدار  $\phi$  را برای دیوارهای برشی ارائه می‌دهد و در نتیجه  $\phi$  براساس مقاومت هدف،  $2/5$  (اعضا) و  $3/5$  (اتصالات) خواهد بود که در جدول 5 برای چهار روش طراحی در نظر گرفته شده و در دو فرضیه‌ی متغیر سیستم ارائه شده است.

پیش‌بینی مشخصات فعلی AISI 5400-15 نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان هدف را با یک حالت محدود اتصال (تقریباً  $3/5$ ) تحت فرض‌های معمول برای تغییرات (جدول a5) فراهم می‌کند. با این حال، اگر تغییرات سیستم از

طریق شبیه سازی MC تخمین زده شود، متغیر اتصال کاهش می یابد و در جدول b5، طراحی فعلی محافظه کارانه است و می تواند فاکتور  $\phi$  را از 0/6 تا 0/82 افزایش دهد و همچنان ارتباط برقرار کند تا به قابلیت اطمینان هدف 3/5 برسد. اثر سیستم، در این مورد، قابلیت قابل توجهی را کاهش می دهد و قابلیت اطمینان پیش بینی را بهبود می بخشد.

اگر مدل دیوار برشی بر پایه ی اتصال دهنده برای جایگزینی راه حل های ارائه شده در AIS1-5400 مورد استفاده قرار گیرد، قابلیت اطمینان بستگی به نحوه ی استفاده از این مدل خواهد داشت. طراحی مهندسی سنتی با استفاده از یک مدل الاستیک و اولین پیش بینی کننده شکست اتصال دهنده، تحت تمام شرایط از مفروضات نامناسب محافظت می شود و کاربرد محدودی در طراحی سیستم های جدید دارد. شاخص های قابلیت اطمینان گزارش شده در جدول 5 نشان می دهد که شبیه سازی قطعی، اساساً یک تحلیل فشار بر روی دیوار برشی است و شبیه سازی کامل MC لازم نیست. کاهش مداوم در حد متوسط قدرت پیش بینی شده که در شبیه سازی MC اتفاق می افتد، سبب کاهش زیاد و متغیر سودمند خواهد شد. این اثر مفید سیستم صرف غلبه برای محاسبه ی قابلیت اطمینان شده است.

اگر مدل شبیه سازی دیوار برشی قطعی با استفاده از مدل مبتنی بر اتصال دهنده برای طراحی و اثر سیستم سودمند نادیده گرفته شود، به عنوان مثال نتایج جدول a5، سپس یک  $\phi = 0.6$  در مورد جریان طراحی، پایایی هدف 3/5 را برآورده می کند. اگر مقدار تغییرپذیری سیستم دیوار برشی کاهش یابد، پس  $\phi$  می تواند به 0/73 برای هدف قابل اطمینان 3/5 یا 0/93 برای هدف قابل اطمینان 2/5 افزایش یابد. تجزیه و تحلیل در یک سری از آزمایشات گسترده قبل از رسیدن نتیجه نهایی مورد نیاز است، اما این کار نشان می دهد که شبیه سازی مبتنی بر اتصال دهنده می تواند، قابلیت اطمینان قابل مقایسه با روش های تجربی مبتنی بر طراحی ارائه دهد و سیستم دارای اثرات بر روی متغیر خواهد شد، سپس عامل  $\phi$  ممکن است، بالاتر از مقدار فعلی 0/6 باشد.

## 9- بحث

ارزیابی قابلیت اطمینان، همانطور که در این تحقیق ارائه شده است، بر پایه‌ی 12 آزمایش دیوار برشی است. تجزیه و تحلیل دیوارهای برشی اضافی، حتی در فریم‌های حاوی CFS و پوشش OSB، باید پیش از توصیه‌های نهایی برای طراحی انجام شود. آزمایش اتصال‌دهنده‌های اخیر توسط معین و همکاران [21] داده‌های بسیار مورد نیاز بر روی پاسخ برشی فولادی اتصال‌دهنده‌ی برشی را برای طیف گسترده‌ای از شرایط فراهم می‌کند و برای هر گونه تحلیلی مورد نیاز است.

**جدول 5:** شاخص قابلیت اطمینان و فاکتورهای مقاومت برای آزمایش‌های دیوار برشی

(a) $V_M$ and $V_F$ per AISI S100-16 connection to wood case				
Design Method	$V_R$	$\beta$ when $\phi = 0.6$	$\phi$ when $\beta = 2.5$	$\phi$ when $\beta = 3.5$
AISI S400-15	0.24	3.60	0.86	0.62
First fastener failure	0.25	4.84	1.29	0.93
Det. simulation	0.23	3.24	0.76	0.55
MC simulation	0.23	3.33	0.78	0.57
(b) $V_M$ and $V_F$ based on MC simulation				
Design Method	$V_R$	$\beta$ when $\phi = 0.6$	$\phi$ when $\beta = 2.5$	$\phi$ when $\beta = 3.5$
AISI S400-15	0.12	4.79	1.04	0.82
First fastener failure	0.14	6.32	1.57	1.22
Det. simulation	0.10	4.37	0.93	0.73
MC simulation	0.10	4.50	0.95	0.76

ارتقاء ویژگی‌های اتصال‌دهنده‌ی تصادفی و مدل دیوار برشی بر پایه‌ی اتصال‌دهنده نیز سبب راه‌حلهایی برای بهبود شده است. مدل تصادفی برای اتصال‌دهنده، پتانسیل تفاوت سفتی اولیه را در نظر نمی‌گیرد، این امر به‌طور بالقوه تغییرات سیستمی اضافی را ارائه می‌دهد و ارزش دنبال کردن آن را دارد. مدل دیوار برشی مبتنی بر اتصال‌دهنده، شکست در داربست، لبه‌ها، و نگه‌دارنده‌ها و مواد پوشش دهنده در خارج از مکان‌های اتصال را شامل نمی‌شود. علاوه بر این، نقش سفتی برشی پوشش در خارج، تأثیری بر سفتی پوشش اتصال‌دهنده‌ی محلی ندارد. علاوه بر این، تماس لبه‌ی ورق به ورق در مدل‌های توسعه یافته را نیز در نظر نمی‌گیرد. تمام موارد می‌تواند بیشتر در بحث پاسخ دیوار برشی و قابلیت اطمینان آن در چند حالت بالقوه، محدود شود.

ارزیابی قابلیت اطمینان برای موارد بارگیری لرزه‌ای به ویژه مشکل ساز است. برای این حالت، پاسخ چرخه‌ی دیوار برشی باید در تحلیل قابلیت اطمینان در نظر گرفته شود. علاوه بر این، فرمول‌بندی قابلیت اطمینان باید دوباره در

نظر گرفته شود. در اینجا مسئله با استفاده از فرمول‌بندی قابلیت اطمینان استفاده شده در AISI 5100 حل شده و از محدود بودن حالت اتصال‌دهنده اجتناب می‌شود. میمند و سکافر در [19] طرحی جدید در مورد اثرات بار لرزه‌ای در AISI 5100 در کالیبراسیون LRFD (به ویژه  $V_Q$  و پیش فاکتور بر اساس ضریب بارگذاری ترکیبی و مورب بودن) ارائه می‌کنند. تغییرات بالا و نتایج شاخص‌های اطمینان، پایین‌تر از حد معمول برای تمام سیستم‌های ساختاری است. محدود کردن حالت‌های خارج از شکست مبتنی بر اتصال‌دهنده (به‌عنوان مثال، کمانش محلی و جهانی در داربست و تری) ممکن است، اما احتمال شکست آنها به‌طور قابل توجهی از طریق استفاده از اصول طراحی مبتنی بر ظرفیت کاهش می‌یابد. با این وجود، این محدودیت‌های دیگر در شبیه‌سازی مبتنی بر اتصال‌دهنده و یا در شبیه‌سازی‌های MC که بر این مدل تکیه می‌کنند، در آینده ممکن است شامل این حالت نشوند.

وضعیت فعلی برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای با استفاده از تجزیه و تحلیل دینامیکی (IDA) افزایش یافته است. مدل مبتنی بر اتصال‌دهنده ارائه شده در اینجا برای رانش مجموعه‌ای از مدل‌های IDA یک ساختمان حاوی فریم‌های CFS استفاده شده است ([15-16]). در روش FEMA P695 تنوع در پاسخ توسط تحلیل IDA در برابر رکوردهای مختلف زلزله ارزیابی می‌شود؛ اما مدل‌ها همیشه قطعی هستند. در حالی که فرض بر این است که تغییرات تقاضای لرزه‌ای بسیار بیشتر از هر گونه تغییر در ظرفیت است، به‌طور کلی اعتقاد بر این است که شبیه‌سازی دیوار برشی MC با استفاده از IDA می‌تواند برای بررسی اثر ظرفیت به‌طور جداگانه از تقاضا استفاده شود. علاوه بر این، تأثیر پاسخ شکست اتصال‌دهنده می‌تواند در تحلیل دینامیکی متفاوت‌تر از تحلیل غیرخطی استاتیک باشد و ارزش مطالعه‌ی بیشتری دارد.

## 10- نتیجه‌گیری

عملکرد جانبی شامل فولاد نورد شده، پوشش چوبی، دیوار برشی تحت تأثیر واکنش محلی در اتصال پوشش به فولاد است. این پاسخ حاصل از یک تعامل کامل بین اتصال‌دهنده و پوشش ورق به ورق است که با یکدیگر متصل می‌شوند و بسیار متفاوت است. دیوار برشی معمولی ممکن است به 100 یا بیشتر از این اتصالات متکی باشد. شبیه

سازی مونت کارلو که در اینجا ارائه شده است، نشان می‌دهد که اگرچه قدرت اتصال بسیار متغیر است، اما توزیع مجدد کافی در دیوارهای برشی به منظور کاهش این قابلیت تغییر پذیری و قدرت نهایی دیوار برشی سیستم بسیار متغیر نیست. در موارد مورد مطالعه در اینجا ضریب تغییرات برای قدرت اتصال‌دهنده‌های منفرد، 13٪ است، در حالی که برای ضریب سیستم قدرت، تغییرات پیش‌بینی شده کمتر از 3٪ است. محدودیت برای توزیع مجدد در میان اتصال‌دهنده‌ها وجود دارد، به‌طوری‌که قدرت متوسط دیوار برشی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (تقریباً 3٪) که کمتر از پیش‌بینی‌های تعیین شده است. علاوه بر این، ضرایب همبستگی برای مکان‌های اتصال‌دهنده (مثلاً در نزدیکی گوشه‌ها) استفاده می‌شود که برای تعیین قدرت دیوار مهمتر از بقیه موارد است. بررسی روش‌های طراحی دیوار موجود و پیشنهاد شده نشان می‌دهد که کاهش پیش‌بینی شده در تنوع یک مزیت عمده‌ی سیستم در هنگام در نظر گرفتن قابلیت اطمینان است. براساس تجزیه و تحلیل ارائه شده در اینجا، عامل مقاومت فعلی استفاده شده در استاندارد موسسه آهن و فولاد آمریکایی برای دیوارهای برشی نورد شده (AISI S400-15) ممکن است بیش از حد محافظه‌کارانه باشد. پیش‌بینی شاخص قابلیت اطمینان دیوار برشی،  $\beta$  در این مطالعه برابر با 4/8 در مقابل هدف 3/5 است. تحلیل‌های اضافی و عوارض مربوط به قابلیت اطمینان لرزه‌ای مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و هدف پیش‌بینی قابلیت اطمینان و طراحی دیوارهای برشی بر پایه‌ی فولاد سرد نورد شده است.

### سپاسگذاری‌ها

این تحقیق توسط بنیاد ملی علوم (ایالات متحده) با کمک CMMI-1300484، 1301033 و 1301001 انجام شده است.

نویسندگان همچنین می‌خواهند از موسسه آهن و فولاد آمریکا برای حمایت در این پروژه، تشکر کنند. هرگونه عقاید، یافته‌ها، و نتیجه‌گیری‌ها یا توصیه‌هایی که در این متن بیان شده است، مربوط به نویسندگان است و لزوماً منعکس‌کننده‌ی دیدگاه‌های بنیاد ملی علوم (ایالات متحده) یا موسسه‌ی آمریکایی آهن و فولاد نیست.