

ارائه‌ی رابطه‌ی تحلیلی محاسبه سختی دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت

مجید قلهکی*، مریم موحدی‌نیا، امید رضایی‌فر

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۴ آبان ۱۳۹۵

بازنگری: ۲۰ آذر ۱۳۹۵

پذیرش: ۴ اردیبهشت ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۸ خرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

دیوار برشی فولادی کامپوزیت
فولاد با تنش تسلیم پایین
سختی

چکیده: دیوار برشی فولادی کامپوزیت یک سیستم نوین باربر جانبی و متشکل از یک ورق فولادی به همراه پوشش بتن مسلح است که این پوشش از یک سمت یا هر دو سمت توسط برش گیرهایی به ورق متصل شده است. در دیوار برشی فولادی کامپوزیت، پوشش بتنی مسلح با مهار کردن ورق فولادی و جلوگیری از کمانش آن باعث بالا رفتن ظرفیت برشی دیوار برشی فولادی تا حد تسلیم در برش داخل صفحه‌ی ورق به جای کشش در راستای میدان کششی می‌شود. در سیستم نوین دیوار برشی فولادی کامپوزیت، فاصله‌ی بین پوشش بتنی و تیرها و ستون‌های مرزی ایجاد می‌گردد. آزمایشات روی دیوار برشی فولادی کامپوزیت معمولی و نوین نشان از خرابی اندک سیستم نوین در مقایسه با سیستم معمولی دارد. در این مقاله به منظور محاسبه سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت، ورق فولادی، قاب و پوشش بتنی از یکدیگر تفکیک شده و با در نظر گرفتن اندرکنش بین آنها (CPFI)، سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت محاسبه شده است. برای در نظر گرفتن اثر سختی بتن در سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت، فاصله بین پوشش بتنی و اعضای مرزی مورد بررسی قرار گرفته و به دنبال آن، دو رابطه برای محاسبه سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از ورق فولادی با تنش تسلیم پایین دارای ضخامت معادل با ورق فولادی معمولی، موجب افزایش سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت خواهد شد. همچنین درگیر شدن پوشش بتنی با اعضای مرزی موجب افزایش مقدار سختی خواهد شد.

۱- مقدمه

فولاد در ساختمان‌های میان و بلند مرتبه می‌گردد. کاربرد این نوع دیوار به دلیل سختی، مقاومت بالا، شکل‌پذیری عالی و رفتار مناسب در مقابل بارهای لرزه‌ای رو به افزایش است [۲].

اولین بار آستانه اصل و همکارانش طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ [۱ و ۳ و ۴]، آزمایش‌هایی را در دانشگاه برکلی کالیفرنیا بر روی دیوار برشی فولادی مرکب انجام دادند که طی آن رفتار نوع جدیدی از این دیوار تحت بارهای چرخه‌ای بررسی شده و با رفتار دیوار برشی فولادی کامپوزیت معمولی مقایسه شد. تنها تفاوت دیوار برشی نوع جدید با نمونه معمولی در وجود یک فاصله^۱ بین پوشش بتنی و قاب پیرامونی است. مقایسه دو نمونه آزمایشی نوین و معمولی نشان داد که همواره در طول آزمایش تحت تغییر مکان جانبی یکسان، خرابی پوشش بتن مسلح و بولت‌های اتصال در نمونه نوین کمتر بوده و با مطرح شدن فاصله در سیستم نوین، خرابی پوشش بتنی در چرخه‌های نسبتاً بزرگ کمتر از خرابی پوشش بتنی در سیستم معمولی است. همچنین با وجود آنکه در نمونه معمولی (بدون درز) پوشش بتن مسلح از ابتدای آزمایش در تحمل برش مشارکت داشت، اما ظرفیت برشی را به طور قابل توجهی افزایش نداده و سختی نمونه معمولی به مقدار کمی بیشتر از سختی نمونه نوین بود ولی در هر دو نمونه، پوشش بتن مسلح با مهار دیوار برشی فولادی از کمانش کلی ورق فولادی قبل از تسلیم جلوگیری نمود. اصولاً فلسفه ایجاد فاصله بین پوشش بتنی با قاب فولادی محیطی

دیوار برشی فولادی و بتنی به دلیل مزایای بی شمار، یک سیستم مناسب برای مقابله با بارهای جانبی است. اما با این حال این سیستم‌ها دارای ضعف‌هایی بوده و این ضعف‌ها مهندسیین را برآن داشته تا به کمک تکنیک‌های نوین در طرح مقاوم‌سازی دیوار برشی آسیب دیده گام‌های مؤثری بردارند. یکی از این تکنیک‌ها، مرکب کردن دیوار برشی است. دیوار برشی فولادی کامپوزیت متشکل از یک ورق فولادی به همراه پوششی از بتن‌آرمه است که به یک یا دو طرف ورق فولادی توسط برش‌گیرها متصل شده است. در دیوار برشی فولادی، برش طبقه توسط عمل میدان کششی ورق فولادی بعد از کمانش ناشی از فشار قطری تحمل می‌گردد اما در دیوار برشی فولادی کامپوزیت، پوشش بتن‌آرمه ورق فولادی را مقید کرده و از کمانش آن قبل از تسلیم برشی داخل صفحه جلوگیری می‌کند. در نتیجه، ورق فولادی برش طبقه را با تسلیم برشی تحمل می‌نماید. ظرفیت تسلیم برشی ورق فولادی می‌تواند به اندازه قابل توجهی بیش از ظرفیت آن در مقابله با برش ناشی از تسلیم در اثر میدان کششی قطری باشد [۱]. دیوار برشی فولادی کامپوزیت ضمن افزایش ظرفیت برشی سیستم، مقاومت پائل را در برابر عوامل مخرب نظیر خوردگی، آتش‌سوزی، ضربه، انفجار و دیگر موارد افزایش داده و باعث کاهش بیش از ۲۵ تا ۵۰ درصدی در مصرف

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mgholhaki@semnan.ac.ir

بین پوشش بتنی و اجزای مرزی در نظر گرفته شود، هیچ گونه تماسی بین پوشش بتن مسلح و قاب فولادی ایجاد نمی‌شود، لذا این فاصله در آزمایش مورد استفاده قرار گرفته و در مدلها نیز مدنظر قرار گرفت.

شکل ۱، جزییات ابعاد و نحوه بارگذاری آزمایش مذکور را نشان داده که در مدل سازی اجزای محدود، عیناً ورق، قاب، پوشش بتنی در یک طرف ورق و چهار بولت برشگیر، مدل سازی گردیدند.

جدول ۱: مشخصات فولاد مصرفی آزمایش عربزاده و همکاران [۹]

Table 1. Specifications of steel consumables by Arabzadeh et al

مقطع فولادی (Mpa)	مقاومت جاری شدن (Mpa)	مقاومت نهایی (Mpa)	مدول ارتجاعی (Mpa)
بال ستون ها و تیر ها	۳۰۸	۴۷۹	۲۰۰۰۰۰
جان ستون ها و تیرها	۲۸۵	۴۴۶	۲۰۰۰۰۰
ورق فولادی	۲۶۸	۴۱۵	۲۰۰۰۰۰
بولت	۱۰۸۰	۱۲۹۰	۲۰۰۰۰۰
میلگرد	۳۳۶	۴۹۲	۲۰۳۰۰۰

جدول ۲: مشخصات بتن مصرفی آزمایش عربزاده و همکاران [۹]

Table 2. Specifications of Concrete Consumption by Arabzadeh et al

مدول ارتجاعی (Mpa)	مقاومت فشاری (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)
۳۰۰۷۱	۴۳	۴

جدول ۳: ابعاد مقاطع نمونه آزمایش عربزاده و همکاران [۹]

Table 3. Dimensions of the sample sections of the experiment by Arabzadeh et al

۲IPE100+2 PL100*5	ستون ها
2IPE100	تیرها
۲	ضخامت ورق فولادی (mm)
۲۰	قطر بولت (mm)
۳	قطر میلگرد (mm)
۳۰	ضخامت بتن (mm)

می‌تواند به دلایل زیر باشد، وجود این فاصله باعث نصب راحت تر دیوار پانل مرکب به قاب فولادی می‌شود. همچنین، این مسأله باعث تسهیل در تولید ورق‌های با پوشش بتنی به صورت پیش ساخته می‌گردد و از نظر رفتار نیز، وجود یک فاصله فولادی باعث افزایش شکل پذیری سیستم نوین نسبت به سیستم معمولی می‌گردد.

پس از آن، تحقیقاتی در زمینه دیوار برشی فولادی کامپوزیت با ساخت مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیل مدل‌های عددی انجام شد که رفتار آنها با بررسی اثرات برخی از پارامترهای طراحی نظیر تعداد برش گیرها، تعداد لایه‌های بتنی مسلح، ضخامت ورق فولادی، ضخامت پوشش بتنی و... مورد مطالعه قرار گرفت. از جمله مهمترین این تحقیقات، می‌توان به تحقیقات دانشگاه امیرکبیر که در سال ۲۰۰۷ توسط رهایی و حاتمی صورت گرفته [۸-۵] و مطالعات آزمایشگاهی و عددی دانشگاه تربیت مدرس که در سال ۲۰۰۹ توسط عربزاده و همکاران انجام شده است [۹-۱۱]، اشاره کرد. مهمترین نتیجه این آزمایشات نشان داد که استفاده از پوشش بتنی در دو طرف ورق فولادی باعث رفتار مناسب تر ورق فولادی و استفاده از تمام ظرفیت آن به همراه جلوگیری از شکست زود هنگام پوشش بتنی می‌گردد.

در این مقاله، به منظور محاسبه سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت، سعی شده است با استفاده از تئوری اندرکنش ورق و قاب، رفتار ورق فولادی، قاب و پوشش بتنی از یکدیگر تفکیک شده و با در نظر گرفتن اندرکنش بین آنها (CPFI)، مبانی طراحی و سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت محاسبه گردد. در این مقاله فاصله بین پوشش بتنی و اعضای محیطی تیر و ستون به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت مورد توجه قرار گرفته است.

۲- صحت سنجی مدل سازی

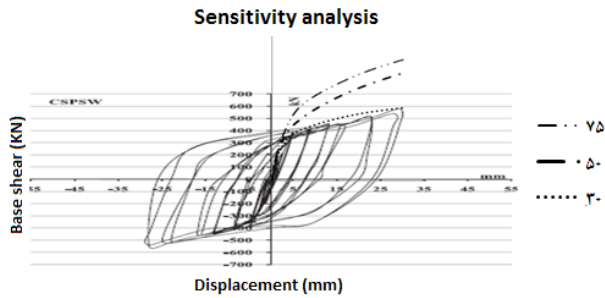
به منظور صحت سنجی مدل سازی‌های عددی، آزمایش قاب یک طبقه دیوار برشی فولادی کامپوزیت عربزاده و همکاران [۹] در نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفت.

مدل مورد نظر یک قاب یک طبقه یک دهانه با اتصالات صلب و در مقیاس ۱:۴ بوده که مشخصات فولاد و بتن مصرفی آن به ترتیب در جدول ۱ و ۲ و ابعاد مقاطع و اجزای آن در جدول ۳ آورده شده است.

علت استفاده از بتن پرمقاومت در آزمایش‌ها، تمایل به ترک خوردگی کمتر در پوشش بتنی عنوان شده است. میلگردها به میزان ۱ درصد حجم بتن در داخل آن به صورت یک سرفه قرار داده شده و بولت‌های برشگیر نیز با مقاومت بالا انتخاب شده تا در طی مراحل آزمایش در ناحیه خطی باقی مانده و دچار صدمه نشوند.

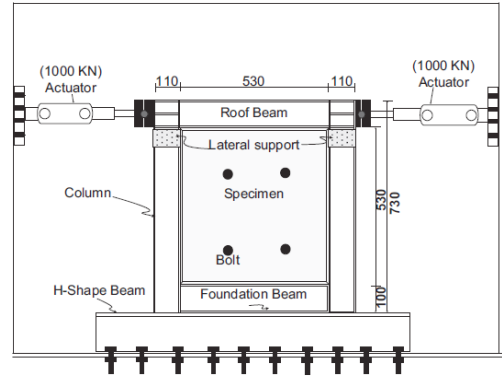
با توجه به این که یکی از اهداف آزمایش، استفاده از پوشش بتن مسلح فقط برای جلوگیری از کماتش ورق بوده و قرار نیست در مقاومت جانبی سیستم مشارکت داشته باشد، لذا قبل از انجام آزمایش، توسط تحلیل‌های اجزای محدود مشخص گردید که چنانچه فاصله‌ای در حدود ۱۱/۲۵ میلی‌متر

در شکل ۲، نمودارهای تغییرات برش پایه در برابر تغییر مکان طبقه تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون به ازای اندازه های مختلف مش بندی (قاب، پوشش بتنی و ورق فولادی) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، استفاده از مش های با ابعاد ۳۰ میلی متر برای قاب، پوشش بتنی و ورق فولادی بهترین تطابق با رفتار نمونه آزمایشگاهی در محدوده ی سختی، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی را ایجاد نموده، لذا از این مش بندی برای تحلیل ها استفاده گردید.



شکل ۲: آنالیز حساسیت نسبت به مش بندی مدل دیوار برشی فولادی کامپوزیت

Fig. 2. Sensitivity analysis of composite steel shear wall modeling



شکل ۱: جزئیات ابعاد و نحوه بارگذاری آزمایش عربزاده و همکاران [۹]

Fig. 1. Details of the dimensions and the manner of loading of the test by Arabzadeh et al

برای دست یافتن به تعداد و ابعاد مش های بهینه ی مورد استفاده در تحلیل عددی و کاهش درصد خطای حاصل از مش بندی و همچنین جلوگیری از صرف زمان بسیار زیاد برای تحلیل ها، تحلیل حساسیت مش بندی صورت گرفت. بدین منظور، سه طیف مش بندی مختلف برای اجزای گوناگون نمونه، مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شد.

جدول ۴: ابعاد، تعداد و نوع المان های مورد استفاده در آنالیز حساسیت مش بندی

Table 4. Dimensions, number and type of elements used in meshing sensitivity analysis

مرحله آنالیز حساسیت مش بندی	نوع المان	اندازه المان (میلی متر)	شماره المان	تعداد کل المان ها
۱	C3D8R (Frame & Concrete cover)	۷۵	۹۳۶	۱۷۹۴
	S4R (Steel plate)	۷۵	۴۹	
	T3D2 (Reinforcing bar)	۱۵	۷۶۹	
	B31 (Bolt)	۳	۴۰	
۲	C3D8R	۵۰	۱۲۱۸	۲۱۴۸
	S4R	۵۰	۱۲۱	
	T3D2	۱۵	۷۶۹	
	B31	۳	۴۰	
۳	C3D8R	۳۰	۲۳۴۹	۳۴۸۲
	S4R	۳۰	۳۲۴	
	T3D2	۱۵	۷۶۹	
	B31	۳	۴۰	

۳- مدل سازی نمونه ها

به منظور انجام تحلیل های عددی، ابعاد نمونه آزمایشگاهی عربزاده و همکاران [۹]، مورد استفاده قرار گرفت.

برای بررسی تأثیر مقدار تنش تسلیم ورق فولادی بر سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت از دو نوع فولاد با تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال (St 37) و ۱۸۰ مگاپاسکال (فولاد با تنش تسلیم پایین) استفاده شده است. با به کارگیری فولاد کم مقاومت در ورق ها، ضخامت محاسباتی در مقایسه با فولادهای معمولی و پرمقاومت به نسبت مقدار تنش تسلیم دو فولاد افزایش می یابد که این مسأله در مدلسازی لحاظ شده است.

با توجه به این که ضخامت ورق فولادی با تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال، ۲ میلی متر در نظر گرفته شده است، با کمک رابطه ۱ ضخامت معادل ورق فولادی با تنش تسلیم ۱۸۰ مگاپاسکال گردید.

$$F_{wu} = 1/2 b \cdot t \cdot \sigma_0 \rightarrow t = (2F_{wu}) / (b \sigma_0) \quad (1)$$

در رابطه ۱، b عرض پانل، t ضخامت ورق پانل، σ_0 تنش تسلیم ورق و F_{wu} مقاومت نهایی ورق فولادی می باشد.

از رابطه ۱، ابتدا مقاومت نهایی ورق فولادی با تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال محاسبه گردید.

$$F_{wu} = 1/2 * 530 * 2 * 240 = 127200 \text{ N}$$

سپس ضخامت ورق فولادی با تنش تسلیم ۱۸۰ مگاپاسکال به ترتیب زیر محاسبه گردید:

$$t = (2 * 127200) / (530 * 180) = 2.7 \text{ mm}$$

به منظور شناسایی و رهگیری مناسب مدل ها، از نامگذاری مطابق زیر استفاده گردید. این نامگذاری دارای چهار بخش می باشد که بخش اول مشخص کننده تنش تسلیم ستون، بخش دوم نشان دهنده تنش تسلیم ورق، بخش سوم مقاومت فشاری پوشش بتنی و بخش چهارم ضخامت آن را نشان می دهد. بطور مثال، نام $CSPSW_{240-240-43-30}$ نشان دهنده نمونه ای است که در آن تنش تسلیم ستون ۲۴۰ مگاپاسکال، تنش تسلیم ورق ۲۴۰ مگاپاسکال، مقاومت فشاری پوشش بتنی ۴۳ مگاپاسکال و ضخامت پوشش بتنی آن برابر ۳۰ میلی متر در یک طرف ورق است.

۴- محاسبه سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت

یکی از پارامترهای اصلی در طرح هر سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی، مقدار سختی اولیه آن است. در این مقاله تلاش شده است جهت محاسبه سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت، ابتدا ورق فولادی، قاب و پوشش بتنی از یکدیگر تفکیک شده و سختی هر یک از آنها محاسبه گردد. سپس با جمع سختی آنها در محدوده الاستیک، سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت محاسبه گردد. پس از آن نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود با مقادیر بدست آمده از روابط ارائه شده برای محاسبه سختی قاب،

ورق و پوشش بتنی، مقایسه شده و در نهایت با اصلاح برخی از روابط، رابطه ای کلی برای محاسبه سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت ارائه گردد.

پارامترهای مورد استفاده در محاسبات که در ادامه مطرح می شود به شرح زیر می باشد، K_{FFEM} سختی قاب حاصل از نتایج اجزاء محدود، K_F سختی قاب حاصل از نتایج رابطه، $K_{SpswFEM}$ سختی دیوار برشی فولادی (دیوار برشی کامپوزیت بدون پوشش بتنی) حاصل از نتایج اجزاء محدود، $K_{CspswFEM}$ سختی دیوار برشی کامپوزیت نوین حاصل از نتایج اجزاء محدود، $K_{CspswFEM(no\ gap)}$ سختی دیوار برشی کامپوزیت معمولی حاصل از نتایج اجزاء محدود، K_{Pl_Spsw} سهم ورق از سختی دیوار برشی فولادی حاصل از نتایج رابطه، K_{plate} سختی ورق فولادی در حالتی که تنش بحرانی در ورق با تنش برشی حد جاری شدن آن برابر گردد. K_{Pl_Cspsw} سهم ورق فولادی در سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت حاصل از نتایج رابطه، $K_{Pl_CspswFEM}$ سهم ورق از سختی دیوار برشی کامپوزیت حاصل از نتایج اجزاء محدود، K_{Cspsw} سختی معادل سیستم دیوار برشی کامپوزیت نوین و $K_{Cspsw(no\ gap)}$ سختی معادل سیستم دیوار برشی کامپوزیت معمولی.

۴-۱- سختی قاب

سختی خمشی یک قاب فولادی [۱۲] از رابطه ۲ محاسبه می شود.

$$K_F = (6EI_c) / H_c^3 \left((6+a) / (1.5+a) \right) \quad (2)$$

همچنین مقدار a از رابطه ۳ بدست می آید:

$$a = (I_c \cdot L_b) / (I_b \cdot H_c) \quad (3)$$

که در رابطه ۲ و ۳، I_c ممان اینرسی ستون، I_b ممان اینرسی تیر، H_c ارتفاع ستون و L_b طول تیر می باشد.

۴-۲- سختی ورق فولادی در حالت تسلیم برشی

در یک دیوار برشی فولادی، برای محاسبه سختی الاستیک ورق فولادی نازک می توان از رابطه ارائه شده توسط صبوری و رابرتز [۲] مطابق رابطه ۴ استفاده نمود.

$$K_{Pl_Spsw} = Ebt / 4d \quad (4)$$

که در آن E مدول الاستیسیته فولاد، d ارتفاع ورق، b عرض ورق و t ضخامت ورق است.

اما نکته ای که وجود دارد آن است که سختی ورق فولادی در دیوار برشی فولادی کامپوزیت بیشتر از مقدار رابطه ۴ خواهد بود، زیرا در دیوار برشی فولادی کامپوزیت، پوشش بتن مسلح، ورق فولادی را مقید کرده و از کمانش آن قبل از تسلیم جلوگیری می کند. در نتیجه، ورق فولادی برش طبقه را با تسلیم برشی داخل صفحه تحمل می نماید. ظرفیت تسلیم برشی

بنابراین در این شرایط، نیروی برشی ورق فولادی برابر خواهد بود با:

$$F_u = \tau_y b t = \sigma_0 / \sqrt{3} b t \quad (6)$$

در این حالت تغییر مکان ورق فولادی از رابطه ۷ محاسبه می‌گردد:

$$U_e = d \gamma_e \quad (7)$$

که در آن γ کرنش برشی بوده و مقدار آن برابر است با:

$$\gamma_e = \tau_y / G = (\sigma_0 / \sqrt{3}) / G \quad (8)$$

که در آن G ضریب ارتجاعی برشی بوده و برابر است با:

$$G = E / (2(1 + \mu)) \quad (9)$$

در رابطه ۹، μ ضریب پواسون فولاد است.

در این صورت می‌توان سختی ورق را از رابطه ۱۰ بدست آورد:

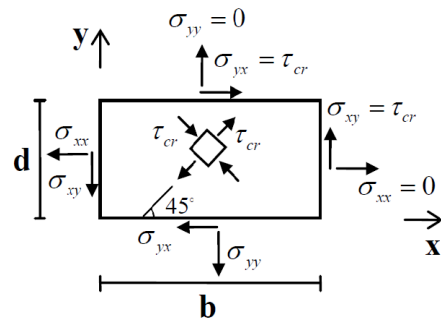
$$K_{plate} = F_u / U_e = G b t / d \quad (10)$$

در صورتی که رابطه ۹ در رابطه ۱۰ جایگذاری شده و $\mu = 0.3$ ، رابطه ۱۱ بدست می‌آید:

$$K_{plate} = G b t / d = E b t / (2.6 d) \quad (11)$$

رابطه ۱۱ سختی ورق فولادی در حالتی که تنش بحرانی در ورق با تنش برشی حد جاری شدن آن، τ_{wy} ، تجاوز نماید، در این صورت، از نقطه نظر تئوریک ورق فولادی زمانی جاری خواهد شد که:

ورق فولادی می‌تواند به اندازه قابل توجهی بیش از ظرفیت آن در مقابله با برش ناشی از تسلیم در اثر میدان کششی قطری باشد که در دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک تحت کماتش رخ می‌دهد. بنابراین در ادامه سعی می‌شود با بررسی وضعیت تنش در ورق فولادی قبل از کماتش، رابطه‌ای برای اندازه‌گیری سختی ورق در حالت تسلیم برشی داخل صفحه بدست آید. مطابق شکل ۳، در یک ورق فولادی تا قبل از کماتش ورق، تنش‌های مساوی کششی و فشاری اصلی در امتداد زاویه ۴۵ و ۱۳۵ درجه تا زمان رسیدن آنها به تنش بحرانی کماتش ورق ایجاد می‌شود.



شکل ۳: وضعیت تنش در ورق فولادی قبل از کماتش [۲]

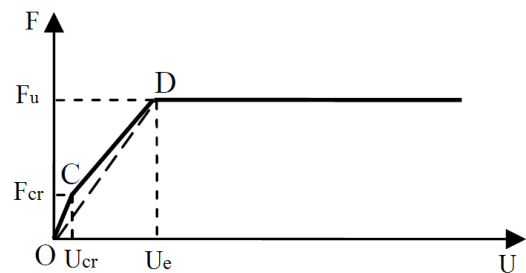
Fig. 3. Stress condition on steel plate before buckling

در صورتی که تنش بحرانی در ورق، τ_{cr} ، از تنش برشی حد جاری شدن آن، τ_{wy} ، تجاوز نماید، در این صورت، از نقطه نظر تئوریک ورق فولادی زمانی جاری خواهد شد که:

$$\tau_{cr} = \tau_y = \sigma_0 / \sqrt{3} \quad (5)$$

که در آن، σ_0 تنش حد تسلیم ورق فولادی در آزمایش تک محوری کششی بوده و مقدار تنش برشی حد تسلیم ورق فولادی، براساس معیار تسلیم فون میزس برابر $\sigma_0 / \sqrt{3}$ می‌باشد.

به عبارت دیگر در این شرایط، نقطه C در شکل ۴ که حد کماتش ورق فولادی را نشان می‌دهد به نقطه D منتقل خواهد شد [۲].



شکل ۴: دیاگرام بار-تغییر مکان برشی ورق فولادی [۲]

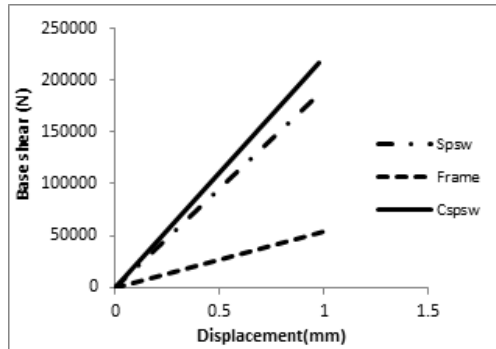
Fig. 4. Load diagram - Shear displacement of steel plate

$$K_{pl_Cspsw} = \alpha E b t / (2.6 d) \quad (12)$$

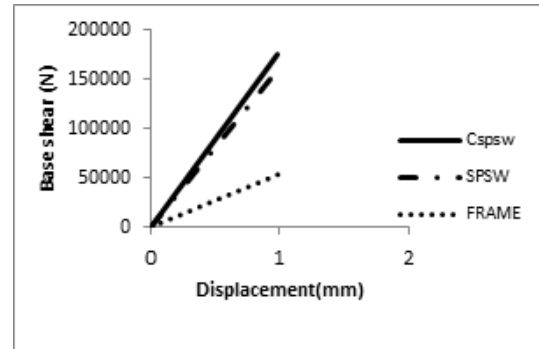
۴-۲-۱- تعیین سختی مدل α Cspsw₂₄₀₋₂₄₀₋₄₃₋₃₀ و ضریب α

پس از مدل‌سازی جداگانه قاب، دیوار برشی فولادی و دیوار برشی فولادی کامپوزیت در نرم‌افزار، برای بدست آوردن سختی مدل‌ها، تغییر مکان واحد در راستای تیر سقف به سازه اعمال شده و نتایج زیر از شکل ۵ بدست آمد.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{FFEM} = 54213.6 \quad \text{N/mm} \\ K_{SpswFEM} = 163318 \quad \text{N/mm} \\ K_{CspswFEM} = 179570 \quad \text{N/mm} \end{array} \right.$$



شکل ۶: نمودار سختی اولیه اجزای دیوار برشی فولادی کامپوزیت Cspsw 240-180-43-30



شکل ۵: نمودار سختی اولیه اجزای دیوار برشی فولادی کامپوزیت cspsw 240-240-43-30

Fig. 6. Primary hardness diagram of composite steel shear walls cspsw 240-180-43-30

Fig. 5. Primary hardness diagram of composite steel shear walls cspsw 240-240-43-30

$$\begin{cases} K_{FFEM} = 54213.6 \text{ N/mm} \\ K_{SpswFEM} = 190808.9 \text{ N/mm} \\ K_{CspswFEM} = 220747.1 \text{ N/mm} \end{cases}$$

و نتایج به شرح زیر حاصل گردید:

با توجه به این که در این مدل نیز سختی پوشش بتنی نقشی در سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت ندارد، لذا سهم ورق در سختی پانل کامپوزیت از نتایج اجزا محدود به صورت زیر بدست می‌آید:

$$K_{Pl_CspswFEM} = K_{CspswFEM} - K_{FFEM} = 166533.5 \text{ N/mm}$$

سهم ورق فولادی از رابطه ۱۲ و با در نظر گرفتن $\alpha = 0.8$ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$K_{pl_Cspsw} = 0.8 Ebt / (2.6 d) = 174461.5 \text{ N/mm}$$

بنابراین سختی پانل برشی فولادی کامپوزیت که در آن پوشش بتنی از المان‌های مرزی فاصله دارد، با در نظر گرفتن اندرکنش قاب، ورق و پوشش بتنی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K_{Cspsw} = (6EI_c) / H_c^3 ((6+a) / (1.5+a)) + 0.8 Ebt / (2.6 d) = 51989.45 + 174461.5 = 226451 \text{ N/mm}$$

که با مقدار بدست آمده از روش اجزا محدود کمتر از ۴ درصد اختلاف داشته که قابل اغماض است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج نشان می‌دهد که از ۸۰ درصد ظرفیت تسلیم برشی تمام ورق فولادی در هر دو مدل، بهره برده شده است که این مسأله می‌تواند مربوط به سطوح گوشه ورق‌ها در دیوارهای برشی فولادی باشد که تحقیقات بیشتر در این زمینه نیاز است. همچنین مقایسه مقادیر سختی نمونه‌های cspsw 240-180-43-30 و cspsw 240-240-43-30 نشان داد که استفاده از ورق فولادی با تنش تسلیم پایین با ضخامت معادل ورق فولادی معمولی، باعث افزایش مقدار سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت به میزان ۲۵ درصد شده است.

همچنین سختی قاب را می‌توان با استفاده از روابط ۲ و ۳ نیز محاسبه کرده و با مقدار بدست آمده از مدل‌سازی مقایسه نمود:

$$K_F = (6EI_c) / H_c^3 ((6+a) / (1.5+a)) = 51989.45 \text{ N/mm}$$

که برای محاسبه آن E ، I_c ، H_c و a به ترتیب برابر 30 mm ، 170000 mm^4 ، 6170000 Mpa و $1/31$ در نظر گرفته شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف سختی بدست آمده از رابطه ۲ و روش اجزا محدود قاب، حدود ۴٪ بوده و لذا می‌توان صحت مدل‌سازی را مورد تأیید قرار داد. لازم به ذکر است در نمونه‌هایی که بتن با المان‌های مرزی فاصله دارد، چون در مراحل اولیه بارگذاری این فاصله بسته نمی‌شود، سختی برشی پوشش بتن مسلح در محاسبه سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت نقشی نداشته و صرفاً به عنوان مقیدکننده ورق فولادی عمل می‌کند.

بنابراین با توجه به آن که در این مدل سختی پوشش بتنی نقشی در سختی دیوار کامپوزیت ندارد، سختی ورق در پانل کامپوزیت از نتایج اجزا محدود به ترتیب زیر بدست می‌آید:

$$K_{Pl_CspswFEM} = K_{CspswFEM} - K_{FFEM} = 125356.4 \text{ N/mm}$$

سپس برای یافتن مقدار ضریب α ، سهم ورق بدست آمده از تحلیل اجزا محدود با رابطه ۱۲ برابر قرار داده شده است:

$$K_{pl_Cspsw} = \alpha Ebt / (2.6 d) = 161538.5\alpha \text{ N/mm}$$

$$K_{Pl_CspswFEM} = 125356.4 \text{ N/mm}$$

و بدین ترتیب مقدار $\alpha = 0.8$ برای ضریب α محاسبه گردید.

براین اساس سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت به روش تحلیلی که در آن پوشش بتنی از اعضای مرزی فاصله دارد، با در نظر گرفتن اندرکنش قاب، ورق و اثر پوشش بتنی به ترتیب زیر بدست می‌آید.

$$K_{Cspsw} = (6EI_c) / H_c^3 ((6+a) / (1.5+a)) + 0.8 Ebt / 2.6 d = 51989.45 + 129230.8 = 1812200.25$$

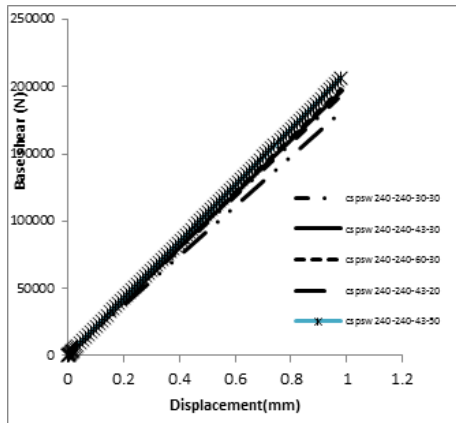
۴-۲- تعیین سختی مدل cspsw 240-180-43-30 و ضریب α
 مراحل مدل‌سازی جداگانه قاب، دیوار برشی فولادی و دیوار برشی فولادی کامپوزیت در نرم‌افزار، مجدداً برای نمونه cspsw 240-180-43-30 انجام

سختی یک دیوار برشی بتنی [۱۲]، با طول L و ارتفاع H مطابق شکل ۵، از رابطه ۱۳ بدست می‌آید:

$$K_w = 3EI / (H^3 [1 + 0.6(1 + \nu)(L/H)^2]) \quad (13)$$

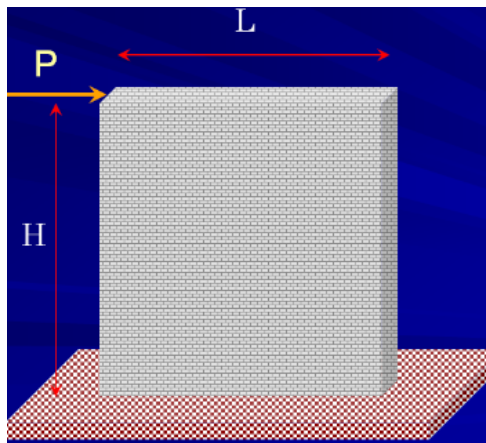
که در آن I ممان اینرسی دیوار به ضخامت t و عرض L بوده و ν ضریب پواسون بتن است.

این رابطه در واقع مجموع سختی خمشی و برشی یک دیوار بتنی را نشان می‌دهد.



شکل ۷: نمودار سختی اولیه مدل‌های دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت معمولی (بدون فاصله)

Fig. 7. Primary hardness diagram of ordinary composite steel shear walls models (no spacing)



شکل ۸: دیوار برشی بتنی

Fig. 8. Concrete shear wall

از آنجایی که پوشش بتنی در دیوار برشی فولادی کامپوزیت معمولی (بدون فاصله)، توسط المانهای مرزی محصور شده است، سعی شده است با در نظر گرفتن ضریب اصلاحی β برای رابطه ۱۳، سهم پوشش بتنی در سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت از رابطه ۱۴ محاسبه گردد:

۵- تأثیر مقاومت و ضخامت پوشش بتن مسلح بر سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت

همان‌طور که مشاهده شد، در مدل‌هایی که بین پوشش بتن مسلح و المان‌های مرزی فاصله وجود دارد به علت آنکه در مراحل اولیه بارگذاری پوشش بتنی با المان‌های مرزی درگیر نمی‌شود، لذا در تحمل برش شرکت نکرده و سختی برشی آن در سختی اولیه دیوار برشی فولادی کامپوزیت نقشی ندارد. بنابراین افزایش یا کاهش مقاومت و ضخامت آن بر روی مطالعات، موضوعیت ندارد. اما چنانچه فاصله بین پوشش بتنی و قاب پیرامونی حذف شود، پوشش بتنی در سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت مشارکت خواهد نمود.

لذا در این بخش برای بررسی تأثیر پوشش بتن مسلح بر سختی اولیه، پنج نمونه با مقادیر متفاوت ضخامت و مقاومت پوشش بتنی بدون فاصله بین پوشش بتنی و قاب محیطی مدل‌سازی و تحت تحلیل بار افزون قرار گرفت. جدول ۵ و شکل ۶ نتایج سختی اولیه پنج مدل مورد بررسی تحت تحلیل بارافزون را نشان می‌دهد.

جدول ۵: مشخصات و سختی اولیه دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت معمولی (بدون فاصله)

Table 5. Specifications and initial stiffness of the composite steel shear walls (no spacing)

مدل	$K_{Cspsw \text{ FEM (no gap)}}$ (N/mm)
cspsw ₂₄₀₋₂₄₀₋₄₃₋₃₀	۲۰۰۹۵۸/۵
cspsw ₂₄₀₋₂₄₀₋₃₀₋₃₀	۱۹۷۴۹۵/۷
cspsw ₂₄₀₋₂₄₀₋₆₀₋₃₀	۲۰۲۸۳۱/۹
cspsw ₂₄₀₋₂₄₀₋₄₃₋₂₀	۱۸۵۰۴۱/۹
cspsw ₂₄₀₋₂₄₀₋₄₃₋₅₀	۲۱۰۸۳۰

تفاوت مدل‌ها فقط در ضخامت و مقاومت بتن پوشش بوده که از بتن‌های با مقاومت ۳۰، ۴۳ و ۶۰ مگاپاسکال با ضخامت‌های ۲۰، ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر در یک طرف ورق فولادی استفاده شده است.

پیش از این، سختی نمونه cspsw₂₄₀₋₂₄₀₋₄₃₋₃₀ که در آن بین پوشش بتنی و المان‌های مرزی فاصله وجود داشت، از تحلیل اجزای محدود برابر 179570 (N/mm) بدست آمد. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقدار بدست آمده از تحلیل اجزای محدود برای این نمونه در حالی که فاصله‌ای بین پوشش بتنی و تیر و ستون‌های مرزی وجود ندارد، برابر $200958/5 \text{ (N/mm)}$ است که نشان می‌دهد در این نمونه، درگیر شدن پوشش بتنی با المان‌های مرزی موجب افزایش حدود ۱۲ درصدی مقدار سختی شده است. سختی قاب و سختی ورق دیوار برشی فولادی کامپوزیت به ترتیب در روابط ۲ و ۱۲ ارائه گردید.

نتایج بدست آمده از رابطه ۱۶ برای ۵ نمونه، در جدول ۶ آورده شده و با مقدار سختی بدست آمده از نرم افزار مقایسه شده است. همچنین سهم سختی بتن پوشش در نمونه‌های مختلف بدست آمده است.

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده ۱۶، با دقت مناسبی، سختی دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت را به روش تحلیلی تخمین می‌زند که البته مطالعات بیشتر بر روی دهانه های با ابعاد متفاوت و بتن‌های با ضخامت و مقاومت بیشتر الزامی است. رابطه ارائه شده ۱۶ که برای هر دو نوع دیوار برشی فولادی کامپوزیت معمولی و نوین با فرض در نظر گرفتن یا در نظر نگرفتن جمله سوم (سختی برشی پوشش بتن)، بر مبنای فرض وجود یک پوشش بتنی با ضخامت و مقاومت مناسب می‌باشد.

در نمونه $csp_{240-240-43-20}$ ، ضخامت کمتر از مقدار کافی برای پوشش بتن باعث شکست پوشش بتن و در نتیجه عدم کارایی مناسب ورق فولادی گردید.

نتایج همچنین نشان داد که در نظر گرفتن فاصله بین پوشش بتنی و قاب پیرامونی باعث کاهش سختی نسبت به حالتی خواهد شد که هیچ گونه فاصله‌ای بین بتن و قاب پیرامونی نباشد. این نتیجه، مطالعات کیهونگ^۱ و آستانه اصل [۴] را تأیید می‌نماید.

با توجه به این که مدل‌سازی‌ها منطبق بر ابعاد نمونه آزمایشگاهی است لذا باید توجه نمود که چنانچه سختی ستون‌ها با سختی ورق و پوشش بتنی تناسبی نداشته باشد، قبل از این که از تمام ظرفیت برشی ورق فولادی و بتن پوشش استفاده شود، ستون‌ها دچار خرابی زود هنگام شده و عملکرد سیستم با مشکل مواجه خواهد شد، لذا دقت در طرح این سیستم الزامی است.

$$K_c = \beta \frac{3EI}{H^3} [1 + 0.6(1+\nu)(L/H)^2] \quad (14)$$

بدین ترتیب برای محاسبه سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت معمولی (بدون فاصله) می‌توان از رابطه ۱۵ استفاده نمود:

$$K_{CSPSW(no\ gap)} = \frac{(6EI_C)/H_c^3 ((6+a)/(1.5+a) + 0.8 Ebt/(2.6 d) + (\beta)3EI/(H^3 [1 + 0.6(1+\nu)(L/H)^2])}{\quad} \quad (15)$$

برای یافتن مقدار ضریب β ، از مساوی قرار دادن نتیجه تحلیل اجزا محدود برای سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت یکی از مدل‌ها و رابطه ۱۵ استفاده شده و صحت آن برای مدل‌های دیگر بررسی شده است. به عنوان مثال جهت تعیین سختی مدل $csp_{240-240-43-30}$ ، ابتدا دیوار برشی فولادی کامپوزیت در نرم افزار مدل‌سازی شده، سپس تغییر مکان واحد به سازه اعمال شده و پس از انجام تحلیل، سختی آن برابر N/mm $200958/5$ تعیین گردید. در صورتی که سهم سختی قاب و ورق طبق روابط ۲ و ۱۲ محاسبه شده و مقدار $K_{CSPSW\ FEM(no\ gap)}$ با مقدار

$K_{CSPSW(no\ gap)}$ مساوی قرار داده شود، ضریب β بدست می‌آید:

$$K_{CSPSW(no\ gap)} = 51989.45 + 129230.8 + 38147.68 \beta$$

$$K_{CSPSW\ FEM(no\ gap)} = 200958.5$$

بدین ترتیب مقدار ضریب β برابر $7/1$ بدست آمده و لذا رابطه نهایی

برای سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت معمولی به صورت رابطه ۱۶ قابل ارائه است.

$$K_{CSPSW(no\ gap)} = \frac{(6EI_C)/H_c^3 ((6+a)/(1.5+a) + 0.8 Ebt/(2.6 d) + (1/7)3EI/(H^3 [1 + 0.6(1+\nu)(L/H)^2])}{\quad} \quad (16)$$

جدول ۶: سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت معمولی

Table. 6. Typical Composite Steel Shear Wall Hardness

مدل	$K_{CSPSW\ FEM(no\ gap)}$	$K_{CSPSW\ (no\ gap)}$	تفاوت دو سختی	K_c	سهم سختی پوشش بتنی
$csp_{240-240-43-30}$	۲۰۰۹۵۸/۵	۱۹۹۹۵۲/۳۱	٪۰/۵	۱۸۷۳۲/۰۶	٪۹
$csp_{240-240-30-30}$	۱۹۷۴۹۵/۷	۱۹۶۴۴۸/۸۴	٪۰/۵	۱۵۲۲۸/۶۳	٪۸
$csp_{240-240-60-30}$	۲۰۲۸۳۱/۹	۲۰۱۱۸۴/۱۸	٪۰/۸	۱۹۹۶۳/۹۷	٪۱۰
$csp_{240-240-43-20}$	۱۸۵۰۴۱/۹	۱۹۲۸۷۵/۷۲	٪-۴	۱۱۶۵۵/۵۱	٪۶
$csp_{240-240-43-50}$	۲۱۰۸۳۰	۲۱۰۳۵۸/۹۸	٪۰/۲	۲۹۱۳۸/۷۶	٪۱۴

۶- نتیجه گیری

در این مقاله دو رابطه تحلیلی برای محاسبه سختی جانبی سیستم دیوار برشی فولادی کامپوزیت در دو حالت وجود و عدم وجود فاصله بین پوشش بتنی و قاب محیطی در محدوده‌ی مدل‌های مورد بررسی ارائه گردید. فلسفه استفاده از پوشش بتنی در این گونه دیوارها، جلوگیری از کمانش ورق فولادی نازک و تغییر مود باربری ورق از حالت مقاومت پس کمانشی (میدان کششی قطری) به مقاومت برشی داخل صفحه بوده که بدین ترتیب مقاومت جانبی سیستم افزایش می‌یابد.

در حالتی که پوشش بتنی با قاب پیرامونی دارای فاصله می‌باشد، فقط به عنوان مقید کننده ورق فولادی محسوب شده و لذا در عمل بار جانبی و سختی سیستم بی‌تأثیر است. اما زمانی که بتن پوشش به قاب محیطی متصل می‌گردد، در سختی جانبی سیستم مشارکت نموده و باعث افزایش سختی سیستم می‌شود.

نتایج مطالعات نشان داد که استفاده از ورق فولادی با تنش تسلیم پایین در مقایسه با فولاد معمولی باعث افزایش سختی سازه می‌گردد. با توجه به این که روابط ارائه شده بر مبنای تعداد محدودی از مدل‌های عددی استخراج شده است، لذا برای کنترل جامعیت روابط نیاز به انجام مطالعات بیشتر بر روی نمونه‌های با ابعاد متفاوت دیگر می‌باشد.

مراجع

- [4] Z. QiuHong, A. Astaneh-asl, Cyclic Behavior of Traditional and Innovative Composite Shear Walls, *Journal of Steel Structures* 7 (2007) 69-75.
- [5] A. Rahai, F. Hatami, Evaluation of Composite Shear Wall Behavior under Cyclic Loadings, *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (2009) 1528-1537.
- [6] A. Rahai, F. Hatami, The effect of intermediate beam spacing and changes in the thickness of concrete casing in steel wall core shear walls, *Proceedings of the first International Conference on Seismic Rehabilitation*, Tehran, 2004.
- [7] A. Rahai, F. Hatami, Comparison of the effect of the beam-to-column connection and the variations of cutter spacing in the steel wall core shear walls, *Proceedings of the first International Conference on Seismic Rehabilitation*, Tehran, 2004.
- [8] F. Hatami, M. Sehri, The effect of steel sheet thickness change on composite shear wall behavior, *Journal of Structural and Steel Research*, 4(4) 2008.
- [9] A. Arabzadeh, M. Soltani, A. Ayazi, Experimental Investigation of Composite Shear Walls under Shear Loadings, *Journal of Thin-Walled structures*, 49 (2011) 842-854.
- [10] A. Arabzadeh, A. Ayazi, Evaluating the Effects of Distance Between Bolts on the Behavior of Composite Steel Shear Wall, *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 14(1) (2013) 145-159.
- [11] A. Arabzadeh, M. Soltani, and A. Ayazi, Effect of different parameters on seismic behavior of composite shear walls Laboratory studies, *Proceedings of the first national congress - Earthquake - Geotechnics*, Mazandaran, Babolsar, (2010).
- [12] N. Siahpolo, *Principles of Applied Earthquake Engineering*, Publishing Padideh, First Edition, 2009.
- [1] A. Astaneh-Asl, *Seismic Behavior and Design of Composite Steel Plate Shear Walls*, Steel Tips, Structural Steel Educational Council, Technical Information & Product Service, 2002.
- [2] S. Sabouri, *Lateral Load Resisting Systems An Introduction To Steel Shear Walls*, Anguizeh Publishing Co, 1th Edn, (2001) 220-227.
- [3] Z. QiuHong, A. Astaneh-asl, *Seismic Behavior of Composite Shear Wall Systems and Application of Smart Structures Technology*, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver 2578 (2004).

Please cite this article using:

M. Gholhaki, M. Movahedinia, O. Rezaie Far, Provide Analytical Relationship to Calculate the Stiffness of Composite Steel Shear Walls, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(3) (2018) 607-616.
DOI: 10.22060/ceej.2017.12082.5125



