



# بررسی تحلیلی و عددی اثر خمش و برش بر رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک

مجید قلهکی<sup>۱</sup>، زهرا ابراهیمی ثابت<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۳۰، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۰۶)

## چکیده

دیوار برشی فولادی در چند دهه اخیر به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در ساختمان‌های مختلف به خصوص در ساختمان‌های بلند مورد توجه قرار گرفته است. نتایج آزمایشات انجام گرفته بر روی دیوارهای برشی فولادی تحت بارهای چرخه‌ای نشانگر سختی زیاد، مقاومت کافی، شکل‌پذیری مناسب و استهلاک زیاد انرژی حاصل از زلزله در این سیستم باربر جانبی است. در دیوارهای برشی فولادی در صورت کوتاه بودن سازه، تغییر مکان‌های برشی حاکم بوده و تعیین کننده سختی جانبی سازه می‌باشد. اما برای سازه‌های متوسط و بلند و یا در دیوارهای با نسبت ارتفاع به عرض بزرگتر از یک، تغییر شکل‌های محوری بزرگ ستون‌ها و تشدید اثرات آن‌ها در ارتفاع باعث می‌شود تا تغییر مکان‌های خمشی حاکم گردد. در این مقاله به منظور بررسی رفتار خمشی و برشی این سیستم، به تحلیل قاب سه طبقه دیوار برشی فولادی به روش شیب-افت اصلاح شده با استفاده از شیوه معادل‌سازی ورق‌های فولادی با فنر پرداخته شده است. به منظور مدل‌سازی رفتار ورق، از سختی ورق روش اندرکنش ورق با قاب استفاده گردیده است. نتایج تحلیل در روش عددی ارائه شده به شیوه شیب-افت اصلاح شده با نتایج تحلیل به روش اجزاء محدود با یکدیگر مقایسه، لکن به دلیل عدم ایجاد میدان کشش قطری کامل در مدل‌های اجزاء محدود و فرض تسلیم کامل ورق در مدل اندرکنش ورق با قاب، اختلافی بین نتایج مشاهده که بر این اساس اثرات میدان کشش قطری ناقص در مدل‌سازی به شیوه شیب-افت اصلاح شده لحاظ گردیده و نتایج، انطباق مناسبی با یکدیگر پیدا نمود.

## کلمات کلیدی

دیوار برشی فولادی، سهم خمش و برش، روش شیب-افت اصلاح شده، میدان کشش قطری

## Analytical and Numerical Study on Bending and Shear Effects of Steel Plate Shear Walls

Majid Gholhaki; Zahra Ebrahimi Sabet

### ABSTRACT

Steel Plate Shear Walls in recent decades as a lateral load resisting system of buildings, especially tall buildings have been discussed. Using this system in tall buildings requires a detailed analysis on behavior of Steel Plate Shear Walls. In tall buildings, bending deformations are more effective. So in this research, three-story Steel Plate Shear Walls are analyzed by modified - slop deflection method which considers bending deformations. The plates in this system are equaled by diagonal springs. Plate - frame interaction method is used for calculating plate stiffness. The process of analysis is conducted in a programming language in order to reduce analysis time. Analytical results in compare with finite element analysis show incorrect assumption in plate - frame interaction method for making complete diagonal tension field in post-buckling phase should be modified. After modifying, analytical results in compare with finite element analysis show good coincidence.

### KEYWORDS

Thin Steel Plate Shear Wall, Bending and Shear Effects, Modified-Slop Deflection, Diagonal Tension Field.

۱- استادیار و عضو پژوهشکده فناوری‌های نوین مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، mgholhaki@semnan.ac.ir (نویسنده مسئول)

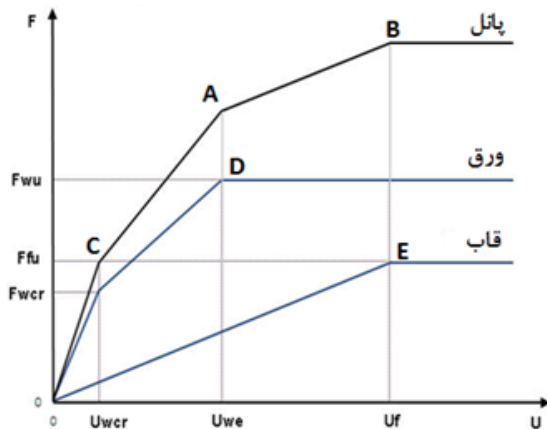
۲- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه سمنان، zes\_66@yahoo.com



بدین ترتیب با در اختیار داشتن رفتار و عملکرد قاب و ورق فولادی به تفکیک و اندرکنش آنها، طراح خواهد توانست قضاوت‌های مهندسی خود را در طراحی یا شناخت کامل اعمال نماید. اما نکته‌ای که در این روش حائز اهمیت است، نادیده گرفتن اثر خمش بر رفتار دیوار برشی فولادی می‌باشد. در این مقاله برای بررسی دقیق‌تر رفتار دیوار برشی فولادی، با در اختیار داشتن نتایج آزمایشگاهی نمونه سه طبقه، به تحلیل آن به روش اندرکنش ورق با قاب، روش اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS و روش تحلیلی شیب-افت اصلاح شده پرداخته شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده است.

## ۲- روش اندرکنش ورق با قاب

در این روش رفتار و عملکرد قاب و ورق فولادی به صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین می‌توان ورق فولادی را قبل و بعد از کمانش مورد بررسی قرار داده و دیاگرام بار جانبی-تغییر مکان برشی آن را به دست آورد. در شکل (۲) دیاگرام بار-تغییر مکان برشی قاب، ورق و پانل نشان داده شده است.



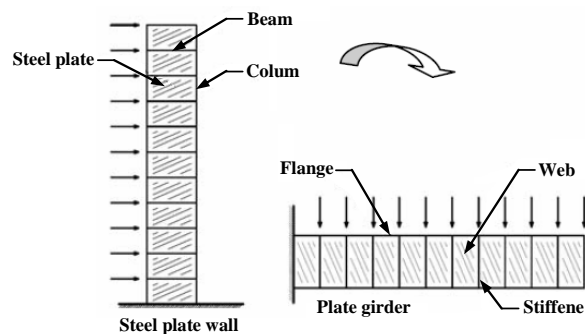
شکل (۲): نمودار بار-تغییر مکان پانل برشی فولادی

در این شکل نقطه C حد کمانش ورق فولادی و نقطه D حد جاری شدن آن بوده و در صورتی که فرض شود اتصالات تیرها به ستون‌ها گیردار و تیرها کاملاً صلب بوده و رفتار قاب به صورت الاستیک و کاملاً پلاستیک باشد، دیاگرام بار-تغییر مکان برشی قاب را می‌توان مطابق

امروزه استفاده از دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی به طور کارآمد در بهسازی لرزه‌ای به منظور افزایش مقاومت جانبی و سختی ساختمان‌ها در برابر زلزله، در سازه‌های بتنی و فولادی مورد توجه قرار گرفته است.

وظیفه اصلی دیوار برشی فولادی مقاومت در برابر نیروهای برشی ایجاد شده در طبقات و لنگر واژگونی حاصل از آن در اثر زمین لرزه می‌باشد. استفاده از دیوار برشی فولادی حتی قبل از آن که ضوابط مربوط به آن توسط آئین نامه‌های طراحی تدوین شود، مورد توجه بوده است. در سال ۲۰۰۴ آئین نامه‌های مختلفی از جمله آئین نامه ساختمانی کانادا و FEMA450 ضوابطی را برای طراحی دیوار برشی فولادی ارائه کردند [۱]. در سال ۲۰۰۵ میلادی ضوابط مربوط به طراحی دیوارهای برشی فولادی ویژه به آئین نامه طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی AISC اضافه گردید [۲].

رفتار دیوار برشی فولادی را می‌توان با عملکرد تیر ورق شبیه‌سازی کرد. مطابق شکل (۱) ستون‌های دیوار برشی فولادی مانند بال‌های تیر ورق، تیرهای آن مشابه با تقویت کننده‌های میانی تیر ورق و ورق فولادی به مثابه جان تیر ورق می‌باشد. تا کنون روش‌های مختلفی برای تحلیل و طراحی دیوارهای برشی فولادی ارائه گردیده است که از میان آنها می‌توان به روش اندرکنش ورق با قاب که در اواخر دهه ۸۰ میلادی توسط صبوری و همکارانش ارائه شده است، اشاره کرد. در این روش رفتار و عملکرد قاب و ورق فولادی به صورت جداگانه در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): مقایسه دیوار برشی فولادی با تیر ورق

شکل (۲) نشان داد. که در آن نقطه E حد جاری شدگی قاب است. برای دستیابی به دیاگرام بار-تغییر مکان برشی پانل، کافی است برای هر تغییر مکان برشی تعریف شده، مقادیر بار جانبی را که مربوط به ورق فولادی و قاب

می باشند با یکدیگر جمع نموده تا دیاگرام مذکور به دست آید [۳]. به منظور محاسبه هر یک از نقاط نمودارها، جدول (۱) مقادیر آنها را به صورت خلاصه نشان داده است.

جدول (۱): معرفی روابط و پارامترهای مورد استفاده در روش اندرکنش ورق با قاب

معرفی پارامتر	پارامتر	روابط مورد استفاده در روش PFI
تنش برشی بحرانی (حد کمانش) ورق فولادی	$\tau_{cr}$	$\tau_{cr} = \frac{K\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$
ضریب ارتجاعی	E	$K = 5.35 + 4\left(\frac{b}{d}\right)^2$ برای $\left(\frac{d}{b}\right) \geq 1$ $K = 5.35\left(\frac{b}{d}\right)^2 + 4$ برای $\left(\frac{d}{b}\right) \leq 1$
ضخامت ورق فولادی	t	
دهانه پانل	b	$F_{wu} = bt(\tau_{cr} + \frac{1}{2}\sigma_{ty})$
بار برشی نهائی ورق فولادی	$F_{wu}$	
تنش حد جاری شدن میدان کششی بوجود آمده در ورق فولادی	$\sigma_{ty}$	$U_{wcr} = \left(\frac{\tau_{cr}}{G}\right)d$
تغییر مکان برشی حد کمانش ورق فولادی	$U_{wcr}$	
ارتفاع پانل (ارتفاع طبقه)	d	$U_{we} = \left(\frac{\tau_{cr}}{G} + \frac{2\sigma_{ty}}{E}\right)d$
تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق فولادی	$U_{we}$	
ضریب ارتجاعی برشی	G	$U_{fe} = \frac{M_{fp}d^2}{6EI_f}$
تغییر مکان برشی حد الاستیک قاب	$U_{fe}$	
ممان پلاستیک در ستونها	$M_{fp}$	$K_f = \frac{24EI}{d^3}$
سختی برشی قاب	$K_f$	
حد جاری شدن ورق فولادی در آزمایش تک محوری کششی	$\sigma_0$	$M_{fp} = \frac{2I_f}{h}\sigma_0$
ممان اینرسی ستون ها	$I_f$	
بار برشی نهایی قاب	$F_{fu}$	$F_{fu} = \frac{4M_{fp}}{d}$
		$F_A = F_{wu} + K_f * U_{we}$
		$F_B = F_{fu} + F_{wu}$
سختی ورق در مرحله قبل از کمانش	$K_{w1}$	$K_{w1} = \frac{Gbt}{d}$
سختی ورق در مرحله پس از کمانش	$K_{w2}$	$K_{w2} = \frac{Ebt}{4d}$

### ۳- آزمایشات انجام شده بر روی نمونه های دیوار برشی

#### فولادی سه طبقه

در سال ۲۰۰۶ صبوری و قلهکی [۴]، دو نمونه دیوار برشی فولادی سه طبقه را که تنها تفاوت آنها در نوع اتصال تیرهای میانی به ستون ها بود، مورد آزمایش قرار دادند. هر دو نمونه بر اساس روش اندرکنش ورق با قاب طراحی [۵] و [۶] و همچنین مفهوم فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) در ورق ها و فولاد پرماقت در ستون ها استفاده شد. به منظور مقایسه روش ها با یکدیگر، از نتایج نمونه دارای اتصال گیردار استفاده شده است.

### ۴- مدل سازی در نرم افزار ABAQUS

یکی از روش های مناسب که به دلیل سرعت و دقت بالا و هزینه کم، نسبت به سایر روش ها رواج زیادی دارد، روش اجزاء محدود است. در این مقاله از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS نسخه 6.10-1 جهت مدلسازی نمونه ها استفاده شده است [۷]. برای مدل سازی تیرها و ستون ها از المان چهارگره ای Shell (S4R) استفاده گردید.

#### ۴-۱- هندسه و مشخصات مصالح

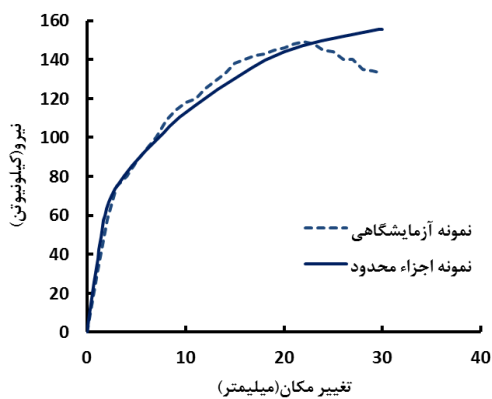
آزمایش سه طبقه دیوار برشی فولادی با ابعاد مطابق شکل (۳) در نرم افزار مدلسازی گردیده و برای تعریف



دو عدد جک هیدرولیکی فشاری که در دو طرف آن نصب گردیده بود و مطابق پروتکل بارگذاری ATC24 انجام شد. اما به منظور صحت سنجی مدل اجزاء محدود، از بار یک جهته و جهت مقایسه رفتار آن از بار چرخه‌ای استفاده شد [۸].

#### ۵- صحت سنجی با نتایج آزمایشگاهی

به منظور بررسی دقت مدل اجزاء محدود در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی، نمودار بار-تغییر مکان مدل اجزاء محدود تحت بارگذاری یک جهته برای طبقه اول قاب با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. به منظور شروع تحلیل کمانش در نرم افزار می‌بایست یک نقص اولیه اجباری در وسط هر ورق و عمود بر آن اعمال نمود. با توجه به نتایج آنالیز و مطابقت منحنی پوش حاصل از اجزاء محدود با منحنی پوش آزمایشگاهی (شکل (۴))، مقدار جابه‌جایی ۲ میلی‌متر به عنوان اعوجاج اولیه به ورق‌ها اعمال گردید.

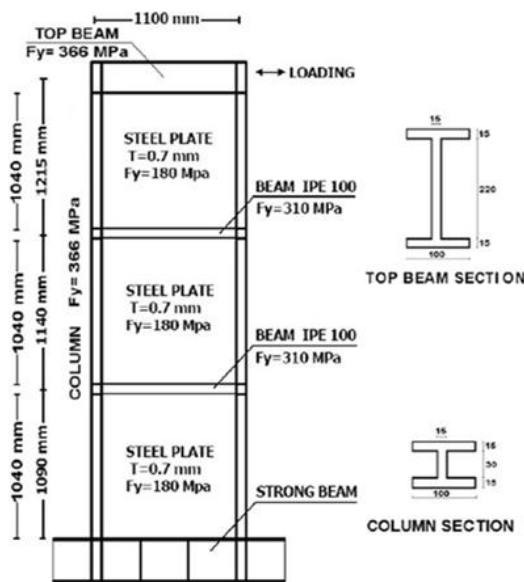


شکل (۴): مقایسه نمودار بار-تغییر مکان پانل پرشی تحت بارگذاری پوش آور

#### ۶- نتایج حاصل از آنالیز اجزاء محدود و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

شکل (۵) وضعیت تنش فون مایسز و میدان کشش قطری مدل اجزاء محدود نمونه سه طبقه را نشان می‌دهد. شکل (۶) نتایج رفتار هیستریزس بار - تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج دارای انطباق مناسبی با یکدیگر بوده و لذا می‌توان به نتایج مدل اجزاء محدود

مشخصات مصالح از مصالح ایزوتروپیک استفاده گردید. مدول الاستیسیته فولاد مصرفی ۲۰۶ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شد. برای تعریف مشخصات پلاستیسیته مصالح از منحنی دو خطی تنش - کرنش فولاد با میزان سخت‌شوندگی ۵ درصد استفاده شد. دیگر خصوصیات مصالح به کار رفته در مدل‌سازی مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شد.



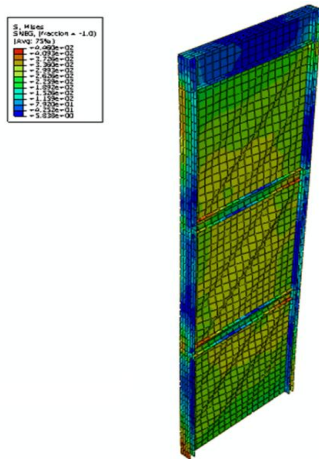
شکل (۳): ابعاد نمونه

جدول (۲): مشخصات مصالح مصرفی (تنش‌ها بر حسب نیوتن بر میلی‌متر مربع)

مشخصات الاستیک		تنش جاری شدگی	تنش فوقانی و ستون	تیرهای میانی
کرنش گسیختگی	تنش گسیختگی			
۰/۰۱۲۵	۳۰۰	۱۸۰	۳۶۶	۳۱۰
۰/۰۱۹۷	۵۵۰	۳۶۶	۳۶۶	۳۱۰
۰/۰۱۴۷	۴۴۶	۳۱۰	۳۶۶	۳۱۰

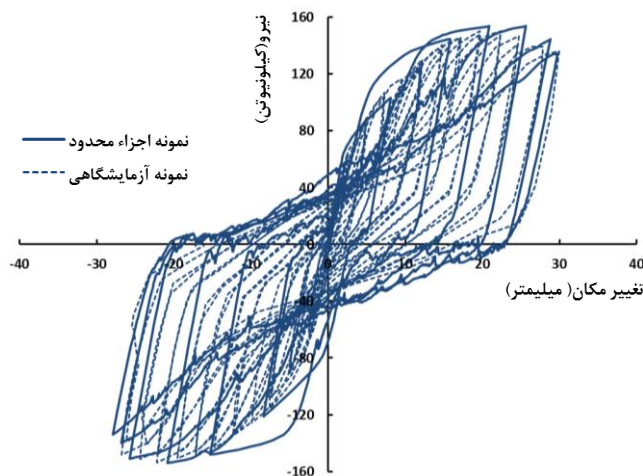
#### ۴-۲- نحوه اعمال بارگذاری نمونه در مدل اجزاء محدود

بارگذاری چرخه‌ای در نمونه آزمایشگاهی به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی فقط در بالای نمونه و توسط



شکل (۵): وضعیت تنش فون مایسز و میدان کشش قطری در قاب ۳ طبقه دیوار برشی فولادی

اعتماد کرد. همانطور که مشاهده می‌شود، ورق در مدل اجزاء محدود در تغییر مکانی حدود ۲/۵۹ میلیمتر و باری معادل ۷۵ کیلونیوتن جاری شده است که برای همین مدل در آزمایشگاه میزان تغییر مکان و نیروی جاری شدگی برای ورق به ترتیب در حدود ۲/۲۴ میلیمتر و ۶۸/۳۲ کیلونیوتن گزارش شده است [۹]. همچنین حداکثر مقاومت نمونه در مدل اجزاء محدود ۱۵۳ کیلونیوتن در تغییر مکان ۲۶ میلیمتر می‌باشد و برای نمونه آزمایشگاهی ۱۵۳ کیلونیوتن و در تغییر مکان ۲۳ میلیمتر مشاهده گردید.



شکل (۶): مقایسه نمودار بار-تغییر مکان طبقه اول دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای

گردیده که در آنها سختی فنرها در هر طبقه برابر با سختی ورق فولادی می‌باشد. معادلات شیب-افت برای عضو تحت اثر خمش و نیروی محوری با استفاده از پارامترهای روابط (۱) و سپس روابط (۲) و (۳) به دست می‌آید.

$$\phi_n = \frac{1}{(kl)^2} (1 - kl \cotg kl)$$

$$\phi_f = \frac{1}{(kl)^2} \left( kl \frac{1}{\sin kl} - 1 \right)$$

$$k = \frac{p^2}{EI}$$

$$\alpha_n = \frac{\phi_n}{\phi_n^2 - \phi_f^2}, \quad \alpha_f = \frac{\phi_f}{\phi_n^2 - \phi_f^2}$$

(۱)

#### ۷- روش شیب-افت اصلاح شده

روش شیب-افت از دقیق‌ترین روش‌های تحلیلی جهت آنالیز سازه‌ها می‌باشد. معادلات روش شیب-افت، گشتاورهای انتهایی هر عضو را بر حسب تغییر شکل نهایی آن عضو بیان می‌کنند. در روش شیب-افت فقط تغییر شکل‌های خمشی در نظر گرفته می‌شوند و از تغییر شکل‌های محوری صرف‌نظر می‌شود. در روش شیب-افت اصلاح شده، روش شیب-افت با در نظر گرفتن اثر نیروی محوری اعضای اصلاح گردیده است. در تحلیل به روش شیب-افت اصلاح شده برای نمونه سه طبقه دیوار برشی فولادی، همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌گردد، ورق‌های فولادی به صورت فنرهای قطری معادل‌سازی

$$EQ6: \sum M_H = 0 \Rightarrow M_{HF} + M_{HG} = 0 \quad (9)$$

$$EQ7: V_1 + (K'_1 + K''_1)\Delta_1 = P_4 + P_5 + P_6 \quad (10)$$

$$EQ8: V_2 + (K'_2 + K''_2)\Delta_2 = P_5 + P_6 \quad (11)$$

$$EQ9: V_3 + (K'_3 + K''_3)\Delta_3 = P_6 \quad (12)$$

در روابط فوق  $\Delta$  تغییر مکان طبقات و  $\theta$  دوران هر یک از گره‌ها  $K'$  و  $K''$  سختی فنرهای معادل است.

همچنین برش طبقات از روابط (۱۳) تا (۱۵) محاسبه می‌شود:

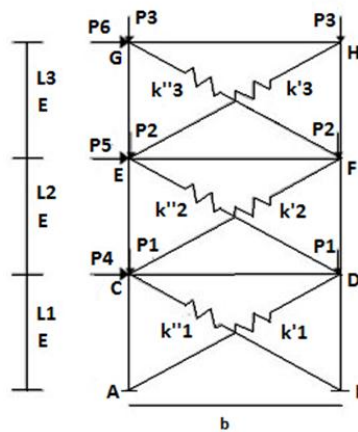
$$V_1 = -(V_{DB} + V_{CA}) = -\frac{(M_{DB} + M_{BD}) + (M_{CA} + M_{AC})}{L_1} \quad (13)$$

$$V_2 = -(V_{FD} + V_{EC}) = -\frac{(M_{FD} + M_{DF}) + (M_{EC} + M_{CE})}{L_2} \quad (14)$$

$$V_3 = -(V_{HF} + V_{GE}) = -\frac{(M_{HF} + M_{FH}) + (M_{GE} + M_{EG})}{L_3} \quad (15)$$

#### ۸- مقایسه نتایج در سه روش تحلیلی اندرکنش ورق

با قاب، اجزاء محدود و شیب-افت اصلاح شده جدول (۳) نتایج حاصل از تحلیل قاب سه طبقه دیوار برشی فولادی را به روش‌های اندرکنش ورق با قاب، روش اجزاء محدود و روش شیب-افت اصلاح شده، در سطوح بارگذاری مختلف نشان می‌دهد. نتایج بار-تغییر مکان پانل‌ها به روش اندرکنش ورق با قاب، نشان داد که ورق‌ها در بار ۷۵ کیلونیوتن جاری می‌گردند. خطای به وجود آمده در نتایج، در روش اندرکنش ورق با قاب به حداکثر ۳۵ درصد نسبت به نتایج تحلیل به روش اجزاء محدود و در روش شیب-افت اصلاح شده به حداکثر ۶۲ درصد رسید که نیاز به اصلاح آنها می‌باشد. با مقایسه نتایج قاب خمشی تنها (بدون ورق داخلی) به سه روش



شکل (۷): قاب ۳ طبقه دیوار برشی فولادی معادل‌سازی شده با فنرهای قطری

$$M_{CE} = \frac{EI_2}{L_2} \left( \alpha_n \theta_C + \alpha_f \theta_E - (\alpha_n + \alpha_f) \frac{\Delta_2}{L_2} \right) \quad (2)$$

$$M_{EC} = \frac{EI_2}{L_2} \left( \alpha_n \theta_E + \alpha_f \theta_C - (\alpha_n + \alpha_f) \frac{\Delta_2}{L_2} \right) \quad (3)$$

در روابط (۱)،  $P$  نیروی محوری وارد بر عضو،  $E$  مدول الاستیسیته و  $I$  ممان اینرسی عضو می‌باشد. بر این اساس لنگرهای انتهای اعضاء قاب مثلاً برای عضو  $CE$  به صورت روابط (۲) و (۳) به دست می‌آید.

با نوشتن این روابط برای تمام اعضای قاب سه طبقه دیوار برشی فولادی و با استفاده از معادلات تعادل مطابق روابط ۴ تا ۱۲ در قالب زبان برنامه‌نویسی فرترن، مجهولات تحلیل به دست می‌آید:

$$EQ1: \sum M_C = 0 \Rightarrow M_{CA} + M_{CE} + M_{CD} = 0 \quad (4)$$

$$EQ2: \sum M_D = 0 \Rightarrow M_{DB} + M_{DC} + M_{DF} = 0 \quad (5)$$

$$EQ3: \sum M_E = 0 \Rightarrow M_{EC} + M_{EF} + M_{EG} = 0 \quad (6)$$

$$EQ4: \sum M_F = 0 \Rightarrow M_{FD} + M_{FE} + M_{FH} = 0 \quad (7)$$

$$EQ5: \sum M_G = 0 \Rightarrow M_{GE} + M_{GH} = 0 \quad (8)$$



مشاهده گردید که ریشه این خطا مربوط به قاب نبوده و تماماً مربوط به ورق فولادی است. عامل ایجاد خطا در روش شیب-افت اصلاح شده، می‌تواند به دلیل فرض اساسی در روش شیب-افت اصلاح شده که بر پایه روش اندرکنش ورق با قاب میزان سختی ورق را لحاظ کرده و جایگزین سختی فنرها می‌کند، باشد. به منظور بررسی و اطمینان از صحت این پیش بینی، در روش شیب-افت اصلاح شده به جای استفاده از سختی ورق‌ها بر اساس تئوری اندرکنش ورق با قاب از مقدار سختی ورق‌ها بر اساس نتایج تحلیل اجزاء محدود استفاده گردید. لذا برای محاسبه مقدار سختی ورق‌ها در هر سطح

بارگذاری، از نتایج تحلیل اجزاء محدود یک بار برای قاب تنها و یک بار برای سیستم دیوار برشی فولادی (متشکل از قاب و ورق) استفاده شد. نتایج تحلیل برای این دو نمونه می‌تواند سهم باربری قاب و ورق را در سیستم دیوار برشی فولادی تعیین نموده و با مشخص بودن سهم باربری قاب و ورق، مقادیر سختی ورق در هر مرحله، قابل محاسبه خواهد بود. جدول (۴) مقادیر سختی ورق در هر سطح بارگذاری و نتایج حاصل از تحلیل سیستم دیوار برشی فولادی به روش شیب-افت اصلاح شده با استفاده از این مقادیر سختی برای ورق‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۳): تغییر مکان نسبی طبقات در قاب سه طبقه دیوار برشی فولادی

طبقه	بار (کیلو نیوتن)	روش شیب افت اصلاح شده	روش اندرکنش ورق با قاب	روش اجزاء محدود	درصد خطا روش اندرکنش ورق با قاب نسبت به اجزاء محدود	درصد خطا روش شیب افت اصلاح شده نسبت به اجزاء محدود
۱	۲۰	۰/۵	۰/۶۴	۰/۵۴	۱۹	-۷
		۰/۵۳	۰/۷۷	۰/۶۹	۱۲	-۲۳
		۰/۵۲	۰/۸۴	۰/۶۷	۲۵	-۲۲
۱	۴۰	۱/۰۲	۱/۲۸	۱/۱۲	۱۴	-۹
		۱/۰۷	۱/۵۴	۱/۴۴	۷	-۲۶
		۱/۰۴	۱/۶۸	۱/۳۸	۲۲	-۲۵
۱	۶۰	۱/۵۴	۱/۹۱	۱/۷۸	۷	-۱۳
		۱/۶۲	۲/۳۰	۲/۳۳	-۱	-۲۲
		۱/۵۶	۲/۵۱	۲/۱۲	۱۸	-۲۶
۱	۸۰	۴/۱۹	۲/۹۱	۳/۷۲	۲۲	۱۳
		۶/۷۳	۳/۷۲	۵/۴۰	-۳۱	۲۵
		۵/۴۵	۴/۵۰	۴/۴۴	۱	۲۳
۱	۱۰۰	۱۰/۲۰	۶/۳۳	۷/۳۵	-۱۴	۳۹
		۱۶/۳۸	۷/۷۰	۱۰/۸۵	-۳۰	۵۱
		۱۳/۲۸	۹/۳۳	۸/۴۵	-۱۰	۵۷
۱	۱۲۰	۱۶/۲۱	۹/۷۵	۱۱/۹۱	-۱۸	۳۶
		۲۶/۰۳	۱۱/۷	۱۸	-۳۵	۴۵
		۲۱/۱۱	۱۴/۱۷	۱۳/۴۹	۵	۵۶

جدول (۴): تغییر مکان نسبی طبقات در قاب سه طبقه دیوار برشی فولادی با اصلاح مقادیر سختی ورق‌ها

درصد خطا	تغییر مکان نسبی طبقات در روش اجزاء محدود	تغییر مکان نسبی طبقات در روش شیب افت اصلاح شده	میزان سختی ورق از روش اجزاء محدود (کیلونیوتن بر میلی‌متر)	بار (کیلونیوتن)	طبقه
۰	۰/۵۴	۰/۵۴	۳۴/۰۴	۲۰	۱
۱	۰/۶۹	۰/۷	۲۷/۱۲		۲
۱	۰/۶۷	۰/۶۸	۲۶/۸۳		۳
-۳	۱/۱۲	۱/۰۹	۳۳/۵۹	۴۰	۱
-۱	۱/۴۴	۱/۴۳	۲۶/۵۷		۲
-۲	۱/۳۸	۱/۳۵	۲۷/۱۰		۳
-۴	۱/۷۸	۱/۷۰	۳۲/۷۸	۶۰	۱
-۳	۲/۳۳	۲/۲۷	۲۵/۱۳		۲
-۵	۲/۱۲	۲/۰۲	۲۷/۴۰		۳
-۸	۳/۷۲	۳/۴۲	۲۱/۳۱	۸۰	۱
-۷	۵/۴	۵/۰۱	۱۴/۶۶		۲
-۱۰	۴/۴۴	۴/۰۱	۱۷/۸۳		۳
-۱۰	۷/۳۵	۶/۵۹	۱۳/۴۶	۱۰۰	۱
-۱۰	۱۰/۸۵	۹/۷۲	۹/۰۹		۲
-۱۳	۸/۴۵	۷/۳۳	۱۱/۶۹		۳
-۱۰	۱۱/۹۱	۱۰/۶۳	۹/۹۲	۱۲۰	۱
-۱۲	۱۸	۱۵/۷۹	۶/۵۴		۲
-۱۵	۱۳/۴۹	۱۱/۴	۸/۷۴		۳

اندرکنش ورق با قاب حاصل گردیده بود، با استفاده از مقادیر واقعی سختی ورق‌ها بر اساس مدل اجزاء محدود حداکثر به ۱۵ درصد کاهش یافته، که این مسئله نشان دهنده آنست که سهم اعظم خطای موجود به دلیل استفاده از سختی ورق به روش اندرکنش ورق با قاب بوده که بدین ترتیب اصلاح گردیده است.

اصولاً نواقص موجود در روش اندرکنش ورق با قاب در تعیین میزان سختی ورق و مقاومت نهایی آن با در نظرگیری سهم کامل ورق جان در تشکیل میدان کشش قطری و نادیده گرفتن اثر خمش بر رفتار دیوار برشی فولادی علل این خطا می‌باشند.

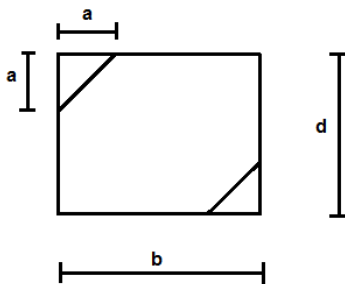
شکل‌های (۸) تا (۱۰) نمودار بار-تغییر مکان سیستم دیوار برشی فولادی به روش اجزاء محدود و شیب-افت اصلاح شده (که در آن از سختی ورق‌ها ناشی از روش اجزاء محدود استفاده شده) را برای هر سه طبقه قاب مقایسه نموده و نشان می‌دهد. مطابق جدول (۴) و شکل‌های (۸) تا (۱۰) همانطور که مشاهده می‌شود، با استفاده از مقادیر سختی ورق از روش اجزاء محدود به جای سختی روش اندرکنش ورق با قاب، مطابقت خوبی بین نتایج حاصل از تحلیل به روش شیب-افت اصلاح شده و نتایج تحلیل به روش اجزاء محدود حاصل گردید. خطای ۶۲ درصدی که در محاسبات بر پایه روش



اصلاح سختی و مقاومت ورق در سطوح مختلف بار وابسته به روش اجزاء محدود است، لذا اصلاح سختی و مقاومت می‌بایست بدون وابستگی به روش اجزاء محدود، در روابط شیب-افت صورت پذیرد.

#### ۹- اصلاح روابط روش اندرکنش ورق با قاب با در نظر گرفتن اثر تشکیل میدان کشش قطری ناقص ورق

به منظور اصلاح روابط موجود در روش اندرکنش ورق با قاب، با در نظر گرفتن میدان کشش قطری ناقص در ورق، شکل (۱۱) برای تشکیل میدان کشش قطری ناقص در ورق فرض گردید. بر اساس نتایج تحلیل به روش اجزاء محدود، مثلی از گوشه‌های ورق به اضلاع  $a$  در مقاومت مرحله پس‌کمانشی شرکت ننموده و بنابراین سختی این قسمت در روابط روش اندرکنش ورق با قاب در مرحله پس‌کمانش حذف گردیده و اصلاحات لازم انجام می‌گیرد.

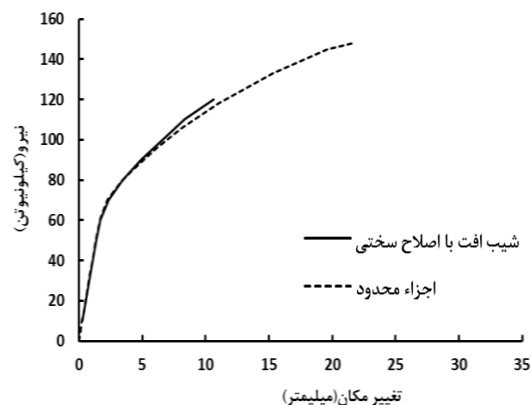


شکل (۱۱): نحوه تشکیل میدان کشش قطری ناقص در ورق

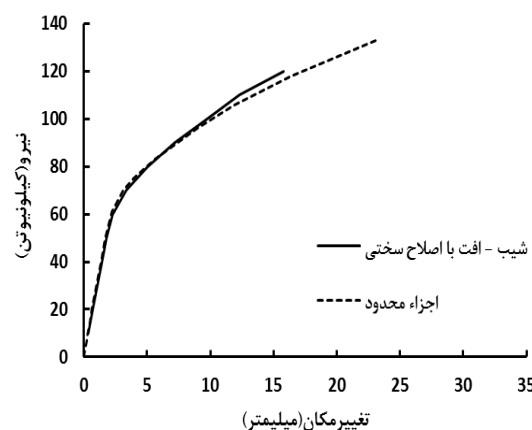
با اصلاح روابط روش اندرکنش ورق با قاب با در نظرگیری اثر تشکیل میدان کشش قطری ناقص در ورق، رابطه سختی در مرحله پس از کمانش ورق به صورت رابطه (۱۵) اصلاح می‌گردد:

$$k_w = \frac{(b-a)^2 t E}{4(bd - a^2)} \quad (15)$$

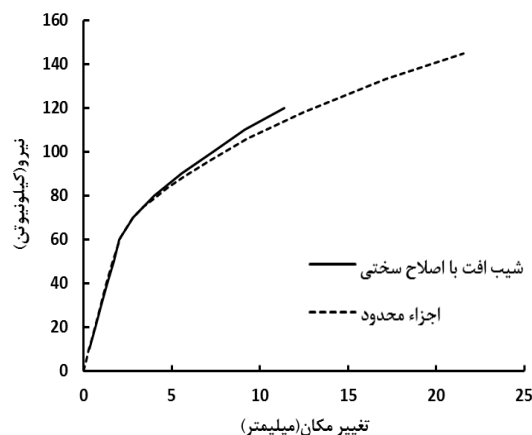
که در این رابطه  $b$  عرض پانل،  $t$  ضخامت ورق،  $E$  مدول الاستیسیته ورق فولادی و  $a$  طولی از ورق است که کمانش ننموده و سهمی در سختی ورق در مرحله پس‌کمانش ندارد. با داشتن مقادیر سختی ورق‌ها از تحلیل



شکل (۸): مقایسه نمودار بار-تغییر مکان طبقه اول دیوار برشی فولادی



شکل (۹): مقایسه نمودار بار-تغییر مکان طبقه دوم دیوار برشی فولادی



شکل (۱۰): مقایسه نمودار بار-تغییر مکان طبقه سوم دیوار برشی فولادی

اگر چه انجام اصلاح فوق باعث کاهش میزان خطاها گردید، اما با توجه به این که استفاده از روش فوق برای

باشد. لذا این نسبت، به نسبت  $P/F_{up}$  (نسبت بار وارده به مقاومت نهایی) نیز وابسته گردیده است. بر این اساس روابط (۱۶) تا (۱۸) به دست می‌آید:

$$\left(\frac{a}{b}\right)_1 = 1.03 \left(\frac{P}{F_{up}}\right)_1 - 0.33 \quad (16)$$

$$\left(\frac{a}{b}\right)_2 = 0.83 \left(\frac{P}{F_{up}}\right)_2 - 0.09 \quad (17)$$

$$\left(\frac{a}{b}\right)_3 = 0.81 \left(\frac{P}{F_{up}}\right)_3 - 0.18 \quad (18)$$

بر اساس روابط فوق و برای هر سطح بارگذاری در مرحله پس از کماتش میزان سختی ورق در روش شیب-افت اصلاح شده اصلاح می‌گردد.

#### ۱۰- بررسی مقادیر سختی الاستیک مدل با اصلاح روابط سختی

جدول (۶) مقایسه مقادیر سختی الاستیک قاب در چهار روش اندرکنش ورق با قاب، اصلاح شده اندرکنش ورق با قاب، شیب-افت اصلاح شده و اجزاء محدود را نشان می‌دهد. در این جدول علائم به کار رفته به شرح زیر می‌باشند:

مطابق نتایج جدول (۶) و با اصلاح میزان سختی در روابط شیب-افت اصلاح شده، نتایج سختی پانل‌های طبقات بسیار به نتایج روش اجزاء محدود (مقادیر واقعی) نزدیک شده (خطا در حد صفر) و این خطا در روش شیب-افت اصلاح شده نسبت به حالت قبل از اصلاح نیز بسیار بهبود یافته است. البته خطایی که همچنان در روش شیب-افت اصلاح شده وجود دارد، مربوط به روابط روش اندرکنش ورق با قاب بوده که اثرات خمش را در قاب تا حدودی نادیده گرفته است.

اجزاء محدود طبق جدول (۴) و قرار دادن آنها در رابطه (۱۵) و با داشتن مشخصات ورق فولادی، معادله‌ای بر حسب مجهول  $a$  به دست خواهد آمد که حل آن برای سطوح مختلف بار، مقادیر  $a$  را در هر مرحله نتیجه می‌دهد. به منظور استفاده از این پارامتر در معادلات روش شیب-افت اصلاح شده در جهت اصلاح سختی ورق‌ها، به جای پارامتر  $a$  از نسبت  $a/b$  استفاده گردیده که برای هر دهانه‌ای قابل استفاده باشد. این نسبت برای سطوح مختلف بارگذاری طبق جدول (۵) به دست آمد.

جدول (۵): نسبت  $a/b$  برای طبقات مختلف قاب دیوار برشی

#### فولادی سه طبقه

بار (کیلونیوتن)	طبقه		
	اول	دوم	سوم
۱۰	۰	۰/۱۲	۰/۱۲
۲۰	۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۱۵
۳۰	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۱۴
۴۰	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۱۴
۵۰	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۱۵
۶۰	۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۱۴
۷۰	۰/۱۳	۰/۳	۰/۲۳
۸۰	۰/۲۶	۰/۴۲	۰/۳۴
۹۰	۰/۳۷	۰/۵۳	۰/۴۳
۱۰۰	۰/۴۶	۰/۶	۰/۵۱
۱۱۰	۰/۵۱	۰/۶۴	۰/۵۶
۱۲۰	۰/۵۷	۰/۶۹	۰/۶۱

مطابق جدول (۵) برای محدوده قبل از تسلیم ورق (قبل از بار ۸۰ کیلونیوتن)، مقدار پارامتر  $a/b$  برابر ۰/۰۵، ۰/۱۵ و ۰/۱۵ برای طبقات ۱ تا ۳ به دست آمده، اما برای محدوده پس از تسلیم ورق (پس از بار ۸۰ کیلونیوتن) پارامتر  $a/b$  در بازه گسترده‌ای تغییر نموده که تعیین یک مقدار ثابت نمی‌تواند تقریب خوبی برای سطوح بارهای مختلف داشته



جدول (۶): مقایسه سختی برای طبقات اول تا سوم در سه روش تحلیلی و روش اجزاء محدود

طبقه	۱	۲	۳	۴	درصد خطا حالت ۱ با ۴	درصد خطا حالت ۲ با ۴	درصد خطا حالت ۳ با ۴
	PFI	M-PFI	S.D.	F.E.			
۱	۴۲/۲۲	۳۸/۸۶	۳۵/۵۰	۳۵/۶۵	۹	۱۸	۰
۲	۴۱/۴۵	۳۲/۱۶	۲۷/۹۱	۲۷/۵۸	۱۷	۵۰	۱
۳	۴۰/۵۴	۳۱/۲۳	۲۹/۱۳	۲۸/۷۵	۹	۴۱	۱

## ۱۱- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله به منظور تحلیل عددی سیستم دیوار برشی فولادی به روش شیب-افت اصلاح شده، از شیوه معادل سازی ورق های فولادی با فنر استفاده گردید. نتایج نشان داد که فرض تشکیل میدان کشش قطری کامل در ورق در روش اندرکنش ورق با قاب در تمامی سطوح بارگذاری فرض صحیحی نبوده و عامل اصلی ایجاد خطا (در تحلیل به روش شیب-افت اصلاح شده) و اختلاف در نتایج تحلیل به این روش با روش اجزاء محدود است. با اصلاحات انجام گرفته بر روی روابط روش اندرکنش ورق با قاب و در نظر گیری اثر تشکیل میدان کشش قطری ناقص در ورق، خطا در تحلیل به روش شیب-افت اصلاح شده حدود ۴۷ درصد کاهش یافته و بدین ترتیب سهم اعظم خطای موجود بر طرف گردید. با توجه به این که فرآیند تحلیل در این روش با هدف کاهش در زمان تحلیل (نسبت به روش های تحلیلی دیگر) در یک زبان برنامه نویسی انجام گرفته است، لذا تحلیل این سیستم در زمان بسیار کوتاه و تنها با تغییر درمقادیر پارامترهای دیوار برشی فولادی، با دقت بالا و در زمان بسیار کوتاه امکان پذیر است. لازم به توضیح است که تحلیل غیر خطی این سیستم به روش اجزاء محدود معمولاً ساعت ها به طول انجامیده، در حالی که استفاده از برنامه فوق زمان تحلیل را به حد چند ثانیه کاهش می دهد. علاوه بر این از روابط و برنامه فوق می توان برای دیگر سیستم های مقاوم که در آنها از ظرفیت نهائی عضو مقاوم (نظیر ورق) استفاده می شود نیز بهره جست و فقط میزان سختی عضو مقاوم را جایگزین سختی ورق در این سیستم نمود.

## ۱۲- مراجع

- [1] FEMA. (2003), "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures", FEMA Rep.NO.450, Building seismic Safety Council for FEMA, Washington, D.C.
- [2] American Institute of Steel Construction. (2005), "Seismic Provisions for Structural Steel Building", American Institute of Steel Construction, Chicago.
- [3] صبوری، س. (۱۳۸۰). "سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی، مقدمه ای بر دیوارهای برشی فولادی"، نشر انگیزه.
- [4] Sabouri-Ghomi, S. and Gholhaki, M. (2006), "Cyclic Test on Two Specimens of Three-Story Ductile Steel Plate Shear Wall", Report Submitted to Building and Housing Research Center (BHRC), pp. 167.
- [5] Sabouri-Ghomi, S. and Roberts, T.M. (1991), "Nonlinear Dynamic Analysis of Thin Steel Plate Shear Walls", Computers and Structures, Vol. 39, No. 1-2, pp. 121-127.
- [6] Sabouri-Ghomi, S. and Roberts, T.M., (1992) "Nonlinear Dynamic Analysis of Thin Steel Plate Shear Walls including Shear and Bending Deformations", Engineering Structures, Vol. 14, No. 5, pp. 309-317, (1992).
- [7] Abaqus Standard User's manual, Version (6.10.1), Karlsson and Sorensen.
- [۸] قلهکی، م. و صبوری، س. (۱۳۸۸)، "تاثیر ضریب شکل پذیری بر ضریب رفتار دیوار برشی با ورق نازک"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد.
- [۹] قلهکی، م. (۱۳۸۷)، "اثر نوع اتصال تیر به ستون بر مقاومت و جذب انرژی دیوارهای برشی فولادی شکل پذیر"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران.
- [۱۰] قلهکی، م. (۱۳۹۰)، "اثر شکل پذیری بر ضریب رفتار قاب فولادی سرد نورد شده مسلح شده به دیوار برشی فولادی"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان.