



Mojtaba Pashapour
civil engineering

دیوار برشی نیمه مقید در لبه ها

تهیه کننده مهندس مجتبی پاشاپور آذر (مدرس و طراح سازه)

تدریس خصوصی طراحی سازه بتنی و فولادی با نرم افزار ایتبس و سیف

لینک کانال آموزش، طراحی اجرا [@MP_Civil](https://www.instagram.com/MP_Civil)



دیوارهای برشی فولادی برای مقاومت در برابر نیروهای جانبی زلزله و باد در ساختمانها به ویژه در ساختمانهای بلند، در ۳ دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱].

این سیستم نوین که در جهان به سرعت رو به گسترش است، در ساخت ساختمانهای جدید و همچنین تقویت ساختمانهای موجود به خصوص در کشورهای زلزله خیزی همچون آمریکا و ژاپن به کار گرفته شده است. استفاده از آنها در مقایسه با قابهای خمشی تا حدود ۵۰ درصد صرفه جویی در مصرف فولاد را به همراه دارد [۲].

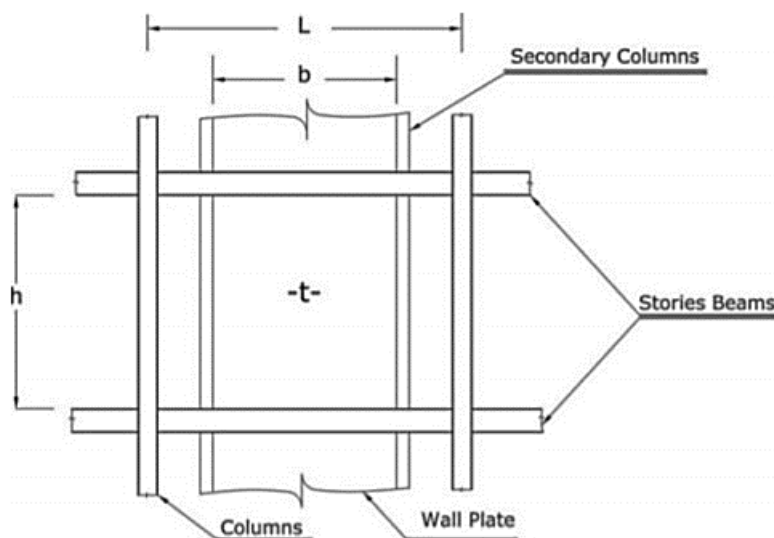
دیوارهای برشی فولادی از تمام ویژگی های لازم برای یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی برخوردار بوده اند، اما مسئله افزایش مقطع ستون های کناری دیوار برشی فولادی (جهت جلوگیری از تشکیل مفصل پلاستیک و تهدید پایداری کلی سازه) بعنوان معضلی مهم، استفاده از این سیستم را تحت الشعاع قرار داده است. محققین برای رفع این مشکل در سال های اخیر سیستم دیوار برشی فولادی جدیدی را معرفی کرده اند. دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید در لبه ها در دهه اخیر به عنوان یک انتخاب به جای نوع سنتی آن پیشنهاد شده است و بسیاری از محققین به بررسی رفتار و عملکرد آن پرداخته اند. در این سیستم ورق دیوار به جای این که به ستون های اصلی قاب (که بار قائم را تحمل می کنند) متصل شود، به ستون های فرعی متصل می شود که نقشی در باربری قائم ندارند. بدین ترتیب اثر میدان کشش روی ستون های باربر قائم از بین رفته و مشکل افزایش بی رویه به مقطع ستون ها که در نوع سنتی آن بعضا به صورت یک معضل در می آید، حل می گردد. بدیهی است در این سیستم، ورق دیوار قسمتی از دهانه قاب را پر کرده و ستون های فرعی نیز در باربری جانبی مشارکت می کنند. یعنی این ستونها از یک طرف در صفحه دیوار دچار خمش شده و از طرف دیگر از کمانش خارج از صفحه آنها جلوگیری می شود.

نیاز نیرویی در اعضاء مرزی وابسته به مقدار ظرفیت ورق میباشد. به همین دلیل و برای کاهش مقدار نیاز در اعضاء مرزی، از فولاد های LYS برای ساخت ورق دیوار برشی فولادی استفاده میشود.



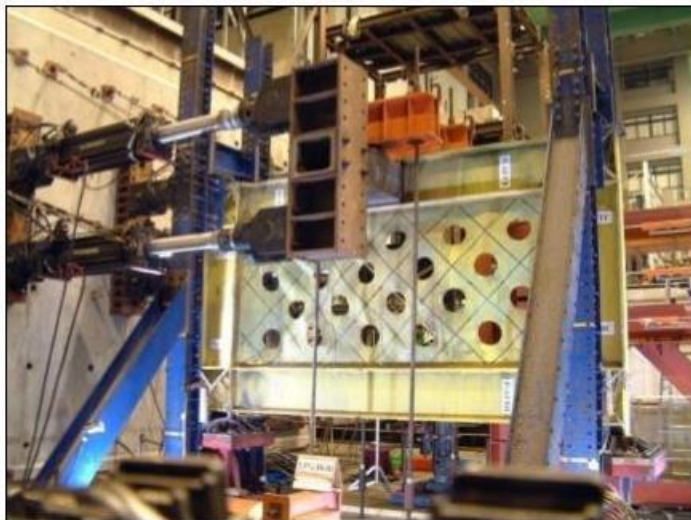
از آن جا که ایده رسیدن به تنش تسلیم پایین در ورقهای فولادی با مصالح LYS کمی دور از دسترس و هزینه بر میباشد، ایده استفاده از دیوار برشی فولادی سوراخدار شکل گرفت که میتواند جایگزینی مناسب برای رسیدن به تنش تسلیم پایین در ورق فولادی و بهینه سازی اعضای مرزی باشد. در واقع هدف اصلی در دیوار برشی سوراخدار کاهش تعمدی ظرفیت ورق از طریق تعبیه سوراخهایی است که با نظم و ضوابط خاصی طراحی شده اند [۳].

در این تحقیق به بررسی الگوی چیدمان سوراخ در دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید در لبه ها پرداخته خواهد شد. بدین منظور مدل اجزای محدود دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه ها پس از انجام صحت سنجی با مدل های آزمایشگاهی ایجاد شده در نرم افزار Abaqus [۴]. مدلسازی و الگوی چیدمان سوراخ در دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار میگیرند. در واقع هدف اصلی در دیوار برشی سوراخدار کاهش تعمدی ظرفیت ورق از طریق تعبیه سوراخهایی است که با نظم و ضوابط خاصی طراحی شده اند. پارامترهای زاویه قرارگیری سوراخها، قطر سوراخ، فاصله سوراخها، نوع آرایش سوراخها بر رفتار دیوار برشی فولادی اثرگذار است که همه این موارد در حالت دیوار برشی با لبه های آزاد بررسی شده و مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.





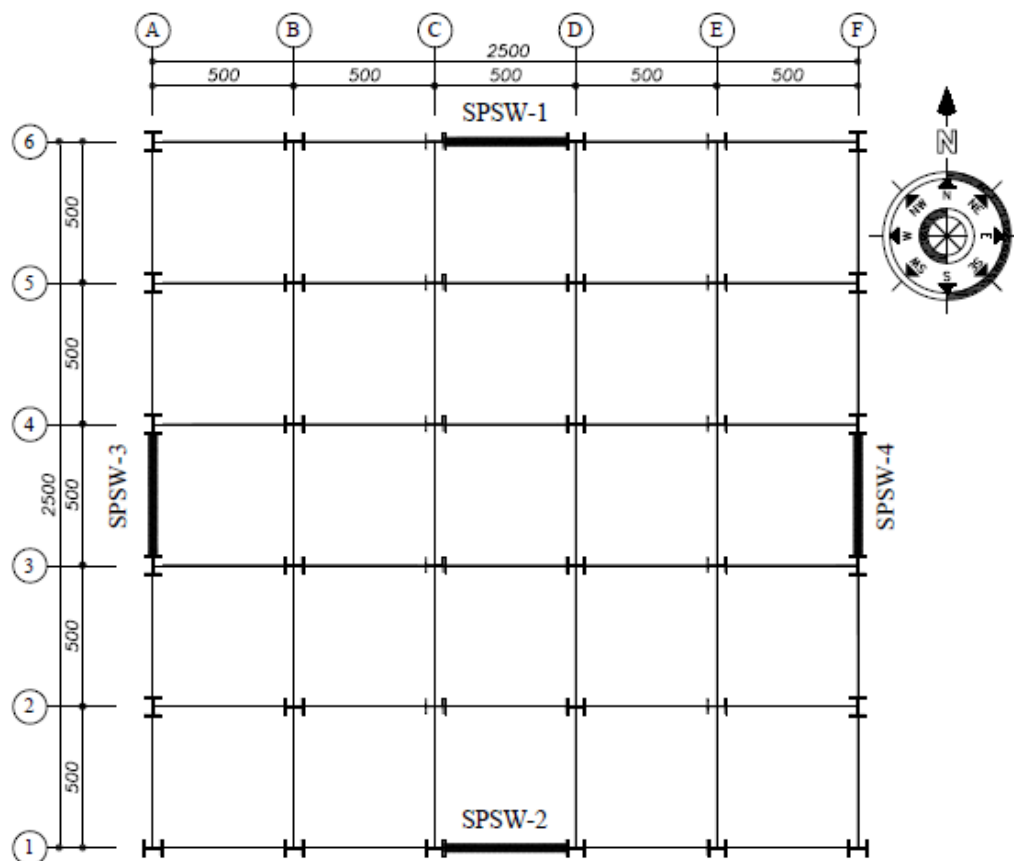
شکل (۱-۱): دیوار برشی نیمه مقید در لبه ها [۵]



شکل (۲-۱): دیوار برشی دارای سوراخ [۶]

۳-۵- طراحی دیوار برشی فولادی

برای طراحی دیوار برشی فولادی، یک ساختمان ۵ طبقه با پلان مطابق شکل ۳-۱۱ واقع در شهر تهران در نظر گرفته شده است. در این پلان در هر راستا ۱ دیوار برشی فولادی در دهانه میانی قرار گرفته است. مشخصات ساختمان مذکور در جدول ۳-۳ آورده شده است. ارتفاع طبقه اول ۳۵۰ سانتی متر و ارتفاع سایر طبقات ۳۰۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. برای تمامی اعضای سیستم لرزه ای از فولاد St37 با مقاومت تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع استفاده شد.



شکل ۳-۱۱- پلان ساختمان ۵ طبقه

جدول ۳-۳- مشخصات ساختمان ۱۰ طبقه

مشخصات	
0/35	شتاب مبنای طرح (A)
1	ضریب اهمیت (I)
7	ضریب رفتار (R)
0/40	زمان تناوب (t)
2/50	ضریب بازتاب ساختمان (B)
II	نوع خاک
0/125	ضریب زلزله (C)

صرفاً جهت سادگی در محاسبات، مقدار بار زنده تمام طبقات برابر ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع، بار زنده

بام برابر ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع، بار مرده تمام طبقات و همچنین بام برابر ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع، بار

پارتیشن معادل برابر ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و همچنین وزن دیوارهای پیرامونی برابر ۶۰۰ کیلوگرم بر متر

طول در نظر گرفته شده است. مقدار وزن طبقات برابر است با:



$$W_1 = W_2 = W_3 = W_4 = (25 \times 25) \times (500 + 100 + 0.2 \times 200) + 4 \times 25 \times 600 = 460 \text{ ton}$$

$$W_5 = (25 \times 25) \times (500 + 0.2 \times 150) + 4 \times 25 \times 200 = 352.1 \text{ ton}$$

در تعیین وزن لرزه‌ای طبقات تا حدود زیادی ساده سازی صورت گرفته و بار جان پناه پشت بام نیز

برابر ۲۰۰ کیلوگرم بر متر طول در نظر گرفته شده است. بنابراین وزن لرزه‌ای سازه برابر است با:

$$W_{total} = 4 \times 460 + 352.1 = 2191.2 \text{ ton}$$

مقدار برش پایه برابر است با:

$$V = CW = 0.125 \times 2191.2 = 274 \text{ ton}$$

برش طبقات در جدول ۳-۴ نشان داده شده است. در این جدول وزن لرزه‌ای با فرض مشارکت ۲۰٪

بار زنده طبقات تعیین شده و بار زنده بام نیز در بار وزن لرزه‌ای مشارکت داده شده است.

جدول ۳-۴ مقادیر برش هر طبقه

طبقه	$h_i(m)$	$W_i(ton)$	$W_i \times h_i^k$	$F_x(ton)$	$V_x(ton)$
5	15/5	351/2	5443/6	73/9	73/97
4	12/5	460	5750	78/14	152/11
3	9/5	460	4370	59/38	211/49
2	6/5	460	2990	40/63	252/12
1	3/5	460	1610	21/88	274/00
مجموع		2191/2	20163/6	274	

۳-۵-۱- طراحی اولیه ورق فولادی

در طراحی اولیه از آنجایی که ابعاد هندسی تیرها و ستون‌ها مشخص نیست، لذا فرض می‌شود که صفحه

جان در هر طبقه در برابر برش کل آن طبقه مقاومت نماید. به دلیل اینکه زاویه میدان کششی در صفحه جان

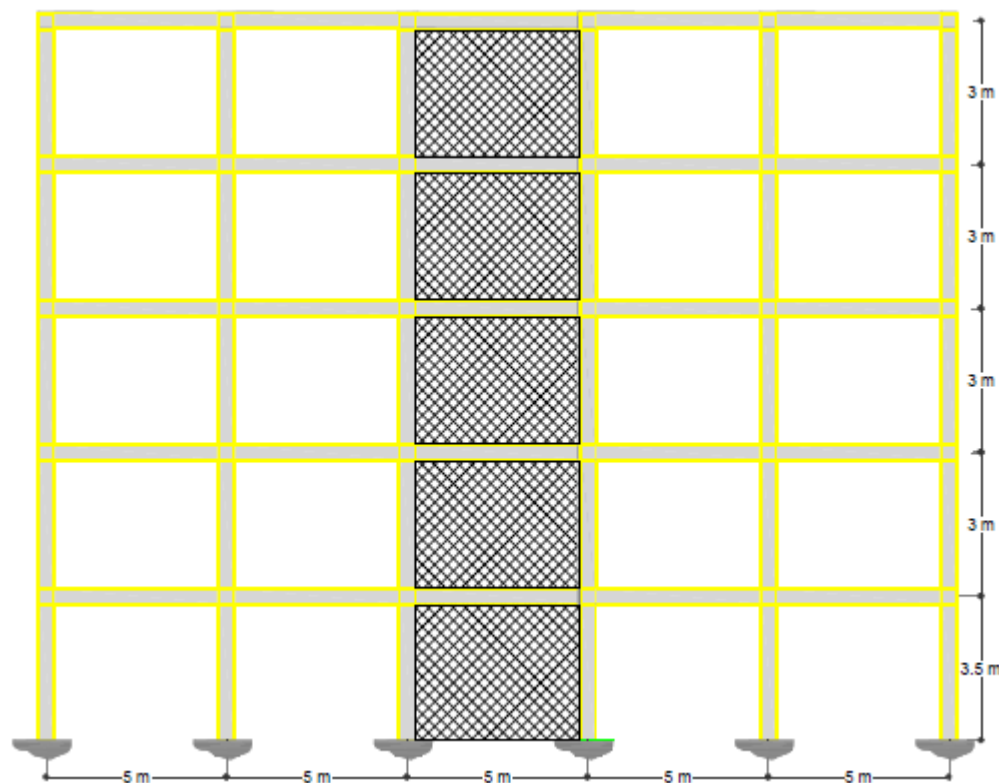
به مشخصات سطح مقطع تیر و ستون، ضخامت صفحه جان و ابعاد قاب وابسته است، لذا زاویه میدان کششی

در طراحی اولیه فرض می‌شود. طراحی‌های معمول نشان می‌دهد که مقدار زاویه میدان کششی در محدوده

۳۰ تا ۵۵ درجه متغیر است [۵]. لذا در اینجا زاویه α برابر ۴۰ درجه فرض می‌گردد. بر اساس این زاویه فرضی،



ضخامت اولیه ورق جان با مساوی قرار دادن برش پایه حاصل از تحلیل استاتیکی با مقاومت موردنیاز صفحه جان به دست می‌آید. لذا مقدار ضخامت موردنیاز صفحه جان بر اساس رابطه ۳-۳۶ می‌باشد.



شکل ۳-۱۲- نمای یکی از قاب‌های دارای دیوار برشی

$$V_u = \phi 0.42 F_{y(\text{plate})} t_w L_{cf} \sin 2\alpha \quad (۱-۳)$$

در این رابطه $F_{y(\text{Plate})}$ تنش تسلیم فولاد، t_w ضخامت ورق فولادی، L_{cf} طول مفید ورق فولادی و α زاویه تشکیل میدان کشش قطری نسبت به محور قائم می‌باشد. که بر اساس این رابطه حداقل ضخامت ورق فولادی از رابطه ۳-۲ قابل محاسبه است.

$$t_w \geq \frac{V_u}{\phi 0.42 F_{y(\text{plate})} L_{cf} \sin 2\alpha} \quad (۲-۳)$$

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید V_u مقاومت برشی موردنیاز بر اساس روش LRFD و ϕ ضریب ایمنی می‌باشد که طبق آیین‌نامه AISC341 برابر ۰/۹ پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که در رابطه فوق L_{cf} طول



خالص صفحه ورق می باشد که با توجه به اینکه در این مرحله فعلاً ابعاد ستون مشخص نیست، لذا در رابطه فوق L_{cf} برابر طول دهانه یا همان L در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه زاویه میدان کششی قطری نیز وابسته به مشخصات قاب و ورق فولادی در هر طبقه است، لذا بایستی فرضیاتی برای به دست آوردن ابعاد اولیه لحاظ شود. ضخامت موردنیاز برای ورق فولادی در طبقه اول برابر با رابطه ۳-۳ است. سایر مقادیر ضخامت ها در طبقات دیگر در جدول ۳-۳ ارائه شده است [۵].

در سازه مورد مطالعه، سختی هر چهار قاب که دارای دیوار برشی هستند، برابر فرض می شود با توجه به وجود دو قاب در هر سمت مرکز جرم، هریک از قاب ها، ۵۰٪ برش طبقه را تحمل می نماید. لیکن برای تخمین و در نظر گرفتن اثرات پیچش تصادفی، میزان هریک از قاب ها را برابر ۵۳٪ در نظر می گیریم.

$$t_w = \frac{145/22 \times 10^3}{0.9 \times 0.42 \times 2400 \times 500 \times \sin(2 \times 40)} = 0.32 \quad (3-3)$$

جدول ۳-۵ محاسبه ضخامت ورق فولادی در هر طبقه

طبقه	V_i (ton)	α	ضخامت مورد استفاده (mm)
5	39/20	40	1
4	80/62		2
3	112/09		3
2	133/62		3
1	145/22		3.5

بر اساس ضخامت انتخابی مقاومت برشی طراحی صفحه بر اساس ضخامت انتخابی (ϕV_n) و نسبت تقاضا

به ظرفیت $\frac{V_u}{\phi V_n}$ در جدول ۳-۶ ارائه شده است.



جدول ۳-۶ مقایسه نسبت تقاضا به ظرفیت در طبقات مختلف

طبقه	ضخامت ورق انتخابی (mm)	$\phi V_n = 0.42 F_y t_w L_{cf} \sin(2\alpha)$ (ton)	V_u (ton)	$\left(\frac{V_u}{\phi V_n}\right)$
5	1	46/64	39/20	0.84
4	2	99/27	80/62	0.81
3	3	148/90	112/09	0.75
2	3	148/90	133/62	0.89
1	3/5	173.72	145/22	0.84

۳-۵-۲- انتخاب مقاطع اولیه برای ستون ها

مرحله سوم، انتخاب مقاطع اولیه برای ستون می باشد. برای طراحی اعضای مرزی قائم در دیوارهای برشی فولادی (VBE) هر دو معیار مقاومت و سختی باید در نظر گرفته شود. از آنجایی که در این مرحله ابعاد هندسی مقطع ستون مشخص نیست، لذا بر اساس معیار سختی که بر اساس مشخصات هندسی قاب و ضخامت ورق در طبقه موردنظر می باشد، می توان حداقل مقدار ممان اینرسی مورد نیاز مقطع ستون را طبق رابطه ای که در ادامه می آید، به دست آورد. برای اینکه کشش در صفحه جان در کل ارتفاع ستون به طور قابل توجهی گسترش یابد، لذا بایستی سختی خمشی داخل صفحه VBE به اندازه ای باشد تا معادله ۳-۴ را ارضا نماید [۵].

$$I_c \geq 0.00307 \frac{t_w h^4}{L} \quad (۳-۴)$$

در معادله فوق، h ارتفاع طبقه (فاصله آکس تا آکس تیرها)، L عرض طبقه (فاصله آکس تا آکس ستون ها)، t_w ضخامت ورق جان و h ارتفاع طبقه برای طراحی اولیه، برابر ارتفاع کف تا کف می باشد. بر اساس این رابطه، مقادیر سختی مورد نیاز ستون در هر طبقه و همچنین مقطع ستون انتخاب شده برای هر طبقه در جدول ۳-۷ ارائه شده است.



جدول ۳-۷ محاسبه حداقل ممان اینرسی موردنیاز برای ستون در طبقات مختلف

طبقه	ضخامت صفحه جان (mm)	مشخصات پانل		ممان اینرسی موردنیاز ستون ($I_{c,min}$) (mm ⁴)	مقطع ستون	ممان اینرسی ستون انتخاب شده (I_c) (mm ⁴)
		L (m)	h (m)			
5	1	5	3	49734000	BOX200x200x15	55180000
4	2	5	3	99468000	BOX250x250x15	109400000
3	3	5	3	149202000	BOX250x250x20	167200000
2	3	5	3	149202000	BOX250x250x20	167200000
1	3/5	5	3/5	322484312/5	BOX300x300x25	349479167

۳-۵-۳- انتخاب مقاطع اولیه برای تیرها

در این قسمت به محاسبه مقاطع اولیه برای تیرها پرداخته می شود. ممان اینرسی حداقل تیر نیز طبق رابطه ۳-۵ تعریف می گردد. حداقل ممان اینرسی موردنیاز برای تیرهای طبقات مختلف در جدول ۳-۸ ارائه شده است.

$$I_{HBE(req)} \geq 0.003 \frac{\Delta t_w L^4}{h} \quad (3-5)$$

جدول ۳-۸ محاسبه حداقل ممان اینرسی موردنیاز تیر در هر طبقه

طبقه	ضخامت صفحه جان	اختلاف ضخامت ورق mm	ممان اینرسی موردنیاز تیر	مقطع تیر	ممان اینرسی mm ⁴
	(mm)		(I_b, min) mm ⁴		
5	1	1	312500000	PL360x8-200x20	320170667
4	2	1	312500000	PL360x8-200x20	
3	3	1	312500000	PL360x8-200x20	
2	3	1	312500000	PL360x8-200x20	
1	3/5	0/5	267857143	PL360x8-200x20	



۳-۵-۴- به دست آوردن زاویه میدان کششی ورق در طبقات مختلف.

تعیین زاویه میدان کششی α به مشخصات هندسی قاب، مشخصات مقاطع اعضای مرزی و ضخامت صفحه جان وابسته است. زمانی که ابعاد اولیه مقاطع اعضای مرزی انتخاب می گردند، با استفاده از معادله ۳-۶ زاویه میدان کششی را می توان اصلاح کرد. مقدار زاویه میدان کشش قطری ورق اصلاح شده در جدول ۳-۹ آورده شده است [۵].

$$\tan^4(\alpha) = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right)} \quad (3-6)$$

جدول ۳-۹ اصلاح زاویه میدان کشش قطری

طبقه	t_w (mm)	ستون		تیر		α
		Section	A_c (mm ²)	Section	A_b (mm ²)	
5	1	BOX200x200x15	9370	PL360x8x-200x20	11600	41.40
4	2	BOX250x250x15	12830	PL360x8x-200x20	11600	41/50
3	3	BOX250x250x20	16980	PL360x8x-200x20	11600	40/85
2	3	BOX250x250x20	16980	PL360x8x-200x20	11600	40/85
1	3/5	BOX300x300x25	27500	PL360x8x-200x20	11600	39/42

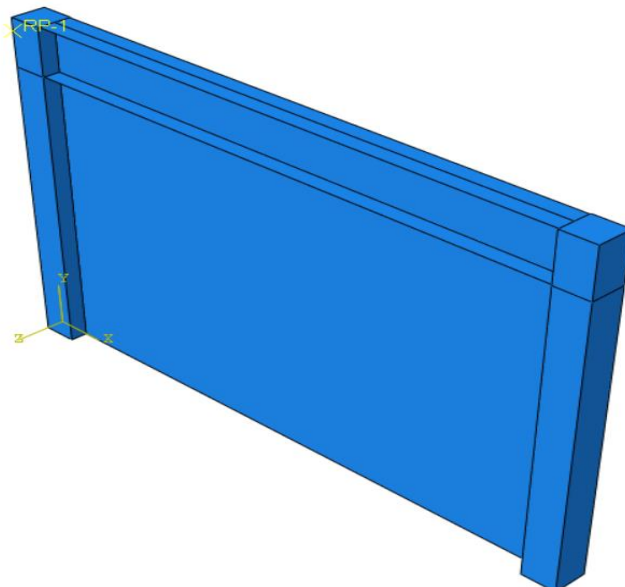
۳-۶- مدلسازی نمونه ها در آباکوس

۳-۶-۱- مدلسازی و مشخصات مصالح

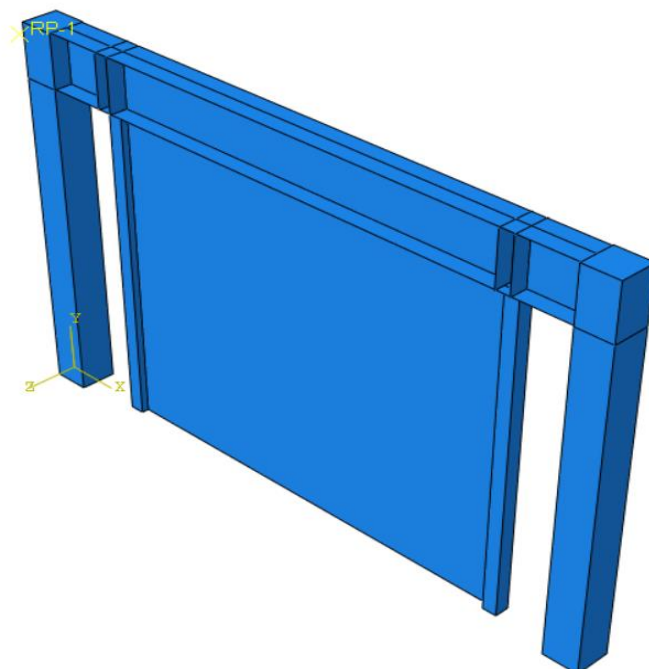
برای مدل سازی در نرم افزار اجزا محدود آباکوس، همانند مدل صحت سنجی از المان پوسته ای استفاده شد. در این حالت برای تیر و ستون، لبه های بیرونی (پشت تا پشت مقطع المان) به عنوان مقطع المان در محیط آباکوس ترسیم و سپس طول عضو به آن اختصاص داده شد. در شکل های ۳-۱۳ و ۳-۱۴ مدل های دیوار برشی فولادی مقید، نیمه مقید بدون سوراخ نشان داده شده است. همچنین در مرحله بعد ضخامت هر



جز از المان‌ها در محیط مشخصات مصالح تعریف و به آن‌ها اختصاص داده شد. همان‌طور که در طراحی اولیه دیوار برشی فولادی گفته شد، در تمامی المان‌ها از فولاد St37 با تنش تسلیم ۲۴۰ مگا پاسکال استفاده شد.



شکل ۳-۱۳- مدل دیوار برشی مقید

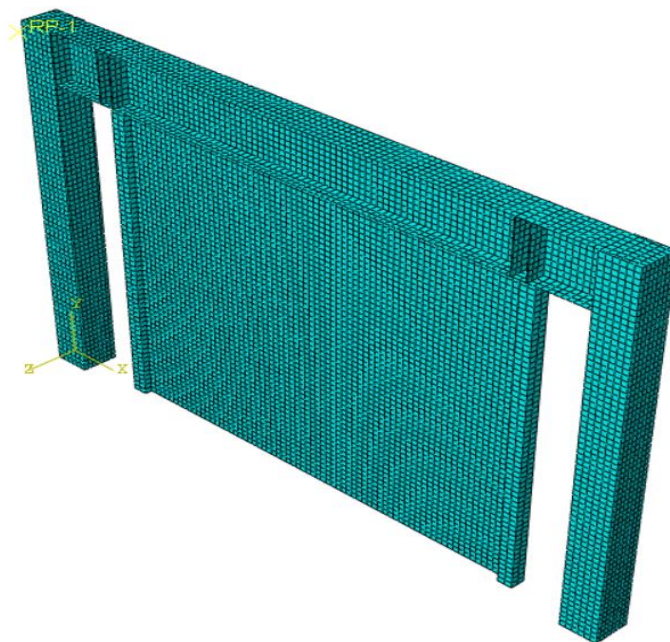


شکل ۳-۱۴- مدل دیوار برشی نیمه مقید



۳-۶-۲- مش بندی و شرایط مرزی

برای مش بندی همانند مدل صحت سنجی از مش ۴ گره‌ای به اندازه ۵۰ میلی متر استفاده شد که در شکل ۳-۱۵ مش بندی مدل دیوار برشی نیمه مقید نشان داده شده است. در این مدل ها پایین ورق و ستون کاملاً مقید شده است و جان تیر به منظور شبیه سازی رفتار ۲ بعدی قاب در راستای عمود بر صفحه مقید شده است. همچنین مطابق با روش صحت سنجی یک نقطه مرجع در تراز تیر معرفی و سپس به لبه بیرونی ستون کوپل شده است و بار جانبی به آن نقطه اعمال شد.



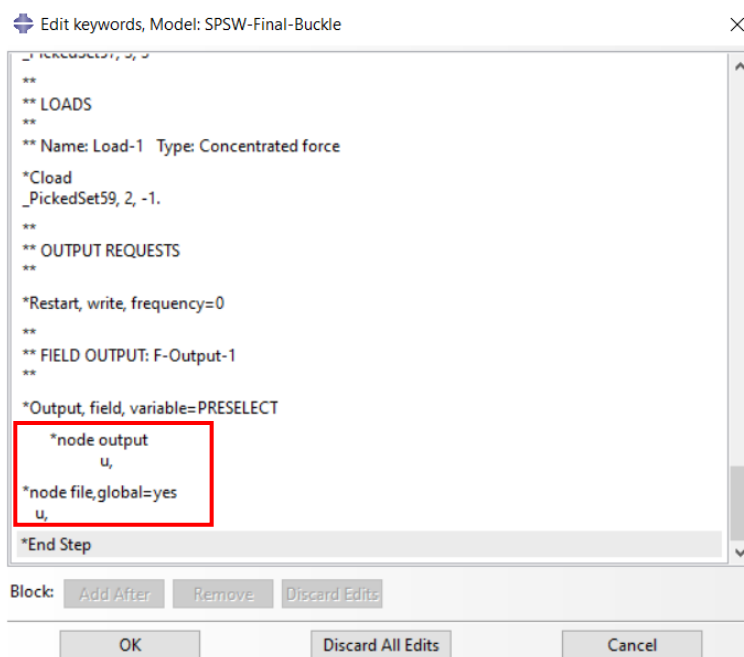
شکل ۳-۱۵- مش بندی مدل نیمه مقید فولادی

۳-۶-۳- انتخاب حل گر

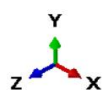
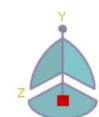
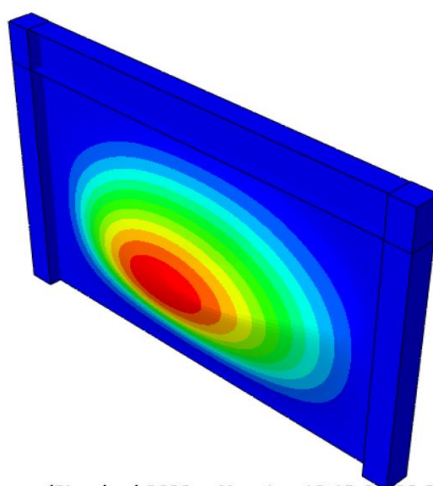
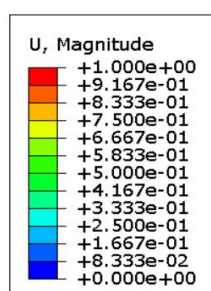
در نرم افزار اجزا محدود آباکوس از حل گر استاندارد استفاده شد. از آنجایی که میدان کشش قطری پس از کمانش ورق فولادی در دیوار برشی فولادی تشکیل می شود، باید به درستی آن را شبیه سازی کرد. دیوار برشی فولادی در حالت ایده آل دارای سختی اولیه و مقاومت بالایی است اما نواقص اولیه باعث کاهش این دو پارامتر می شود. در نتیجه برای انجام صحیح تحلیل استاتیکی غیرخطی در حالت رفت و برگشتی، باید قبل از



تحلیل اصلی یک تحلیل کمانشی انجام شود و سپس با تغییر در ورودی مدل اصلی، تغییر شکل های ناشی از مدهای کمانشی را با اعمال ضرایبی به عنوان مدل هندسی اولیه تحلیل اصلی بکار برد. در تحلیل کمانشی با یک برنامه نویسی ساده، خروجی مدهای کمانشی را به سادگی می توان استخراج کرد که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. شکل ۳-۱۷ تغییر شکل ناشی از مد کمانشی یک را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۶- برنامه نویسی در مدل تحلیل کمانشی

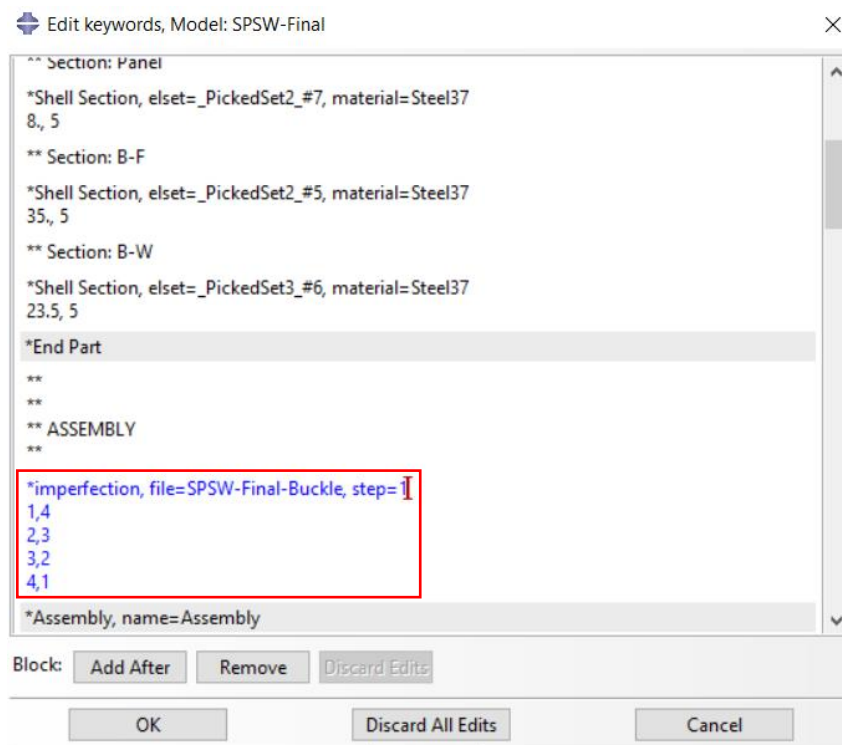


ODB: Job-12.odb Abaqus/Standard 2022 Mon Apr 10 13:24:22 Iran Daylight Time 2023
Step: Step-1
Mode 1: EigenValue = 6.00878E+05
Primary Var: U, Magnitude

شکل ۳-۱۷- تغییر شکل نمونه مدل اجزاء محدود در مد اول

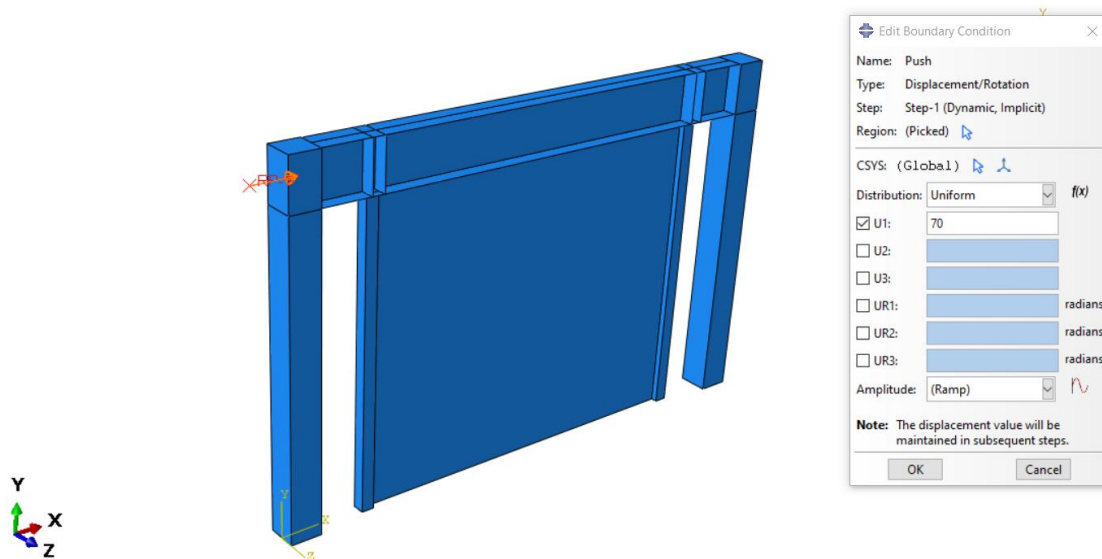


پس از انجام تحلیل کمانشی، برای انجام تحلیل اصلی به منظور اعمال تغییرشکل‌های ناشی از تحلیل کمانشی نیاز به کد نویسی در مدل اصلی می‌باشد که در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است. در این قسمت اثرات ۴ مد کمانشی به عنوان نقص اولیه به مدل اصلی معرفی می‌شود.



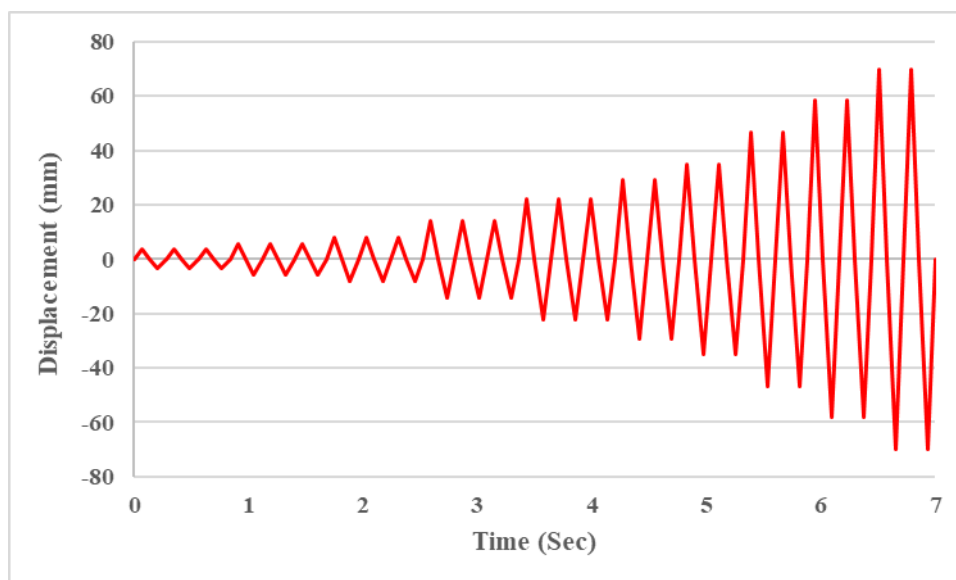
شکل ۳-۱۸- برنامه‌نویسی در مدل اصلی به منظور اعمال نواقص اولیه

ارتفاع طبقه در طراحی کلیه دیوار برشی‌ها با الگوریتم‌های مختلف سوراخ، $\frac{3}{5}$ متر در نظر گرفته شده است و این ارتفاع در تمامی مدل‌ها ثابت می‌باشد. ماکزیمم دریفت برای مدل‌های مختلف دیوار ۲ درصد در نظر گرفته شده است. دریفت ۲ درصد برای دیوار برشی یک طبقه به ارتفاع $\frac{3}{5}$ متر، معادل با جابجایی ۷ سانتی متری دیوار برشی است در شکل ۳-۱۹ نحوه اعمال این بار جانبی به مدل نشان داده شده است.

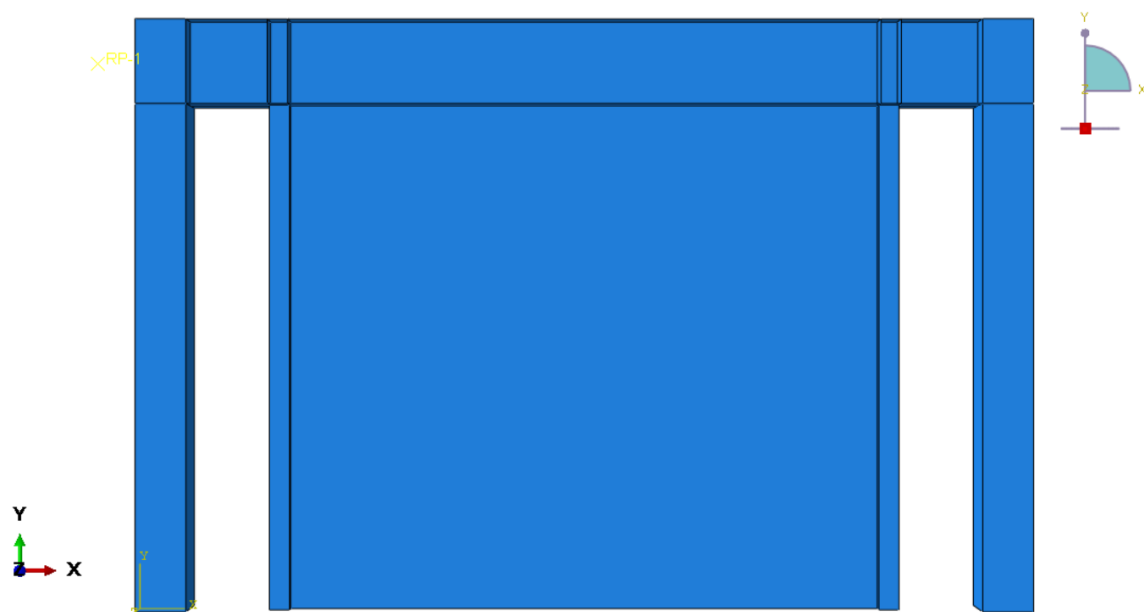


شکل ۳-۱۹- اعمال بار جانبی پوش به مدل نیمه مقید

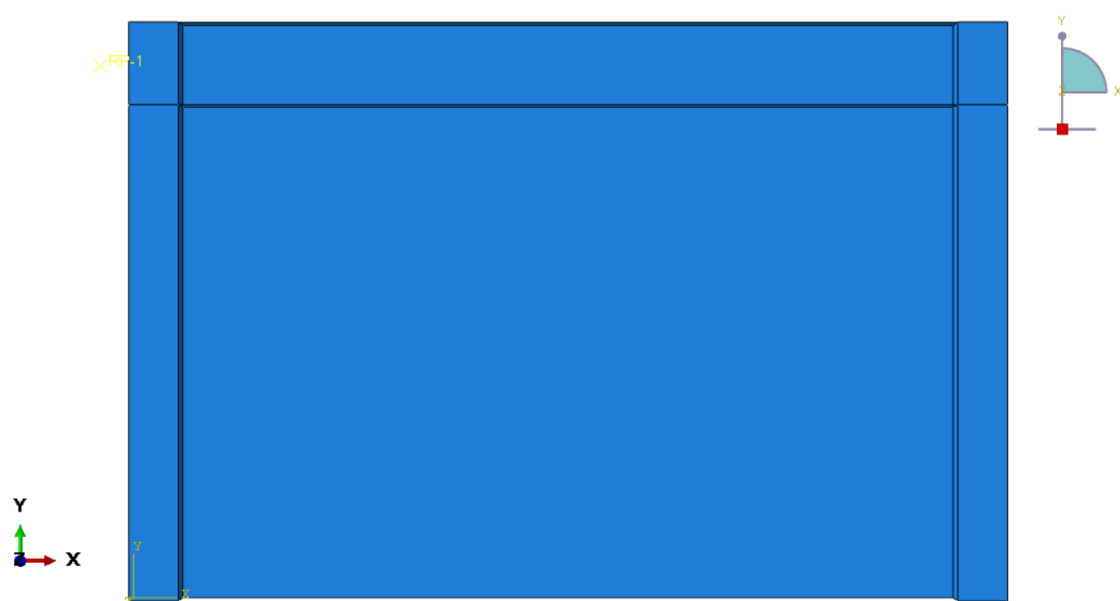
همچنین در این تحقیق برای بررسی منحنی هیستریزیس نمونه دیوار برشی مقید و نیمه مقید یک تحلیل تحت بار رفت و برگشتی از نوع شبه استاتیکی نیز انجام شد. برای اعمال بار رفت و برگشتی ابتدا یک تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام شد و سپس مطابق راهنمای ATC-24 تغییر مکان نقطه تسلیم تعیین شد. پس از مشخص شدن مقدار δ_y بار رفت و برگشتی مطابق شکل ۳-۲۰ ساخته شد.



شکل ۳-۱۸- بار رفت و برگشتی اعمال شده به مدل ها



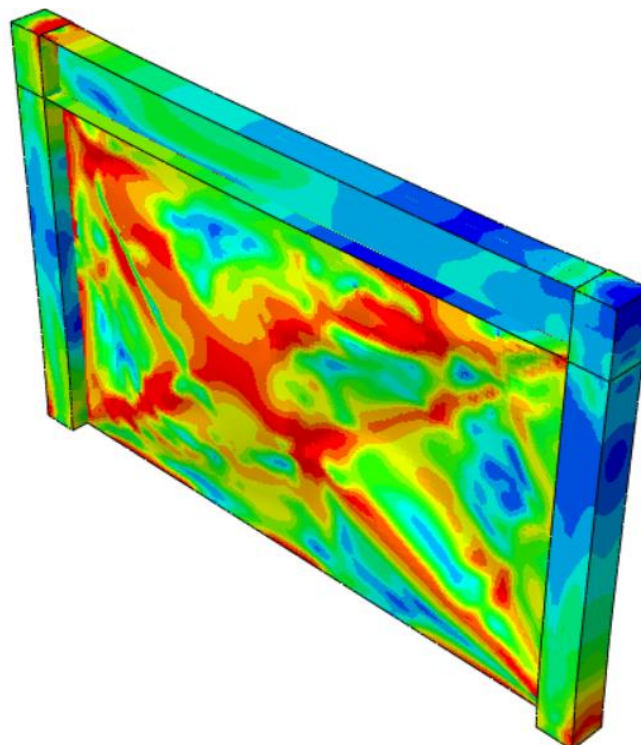
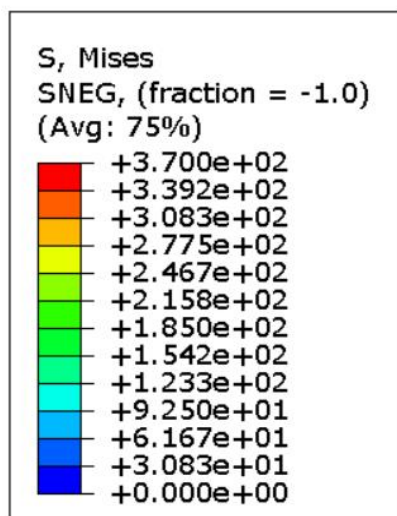
شکل ۳-۲۵- بدون سوراخ مدل G (نیمه مقید)



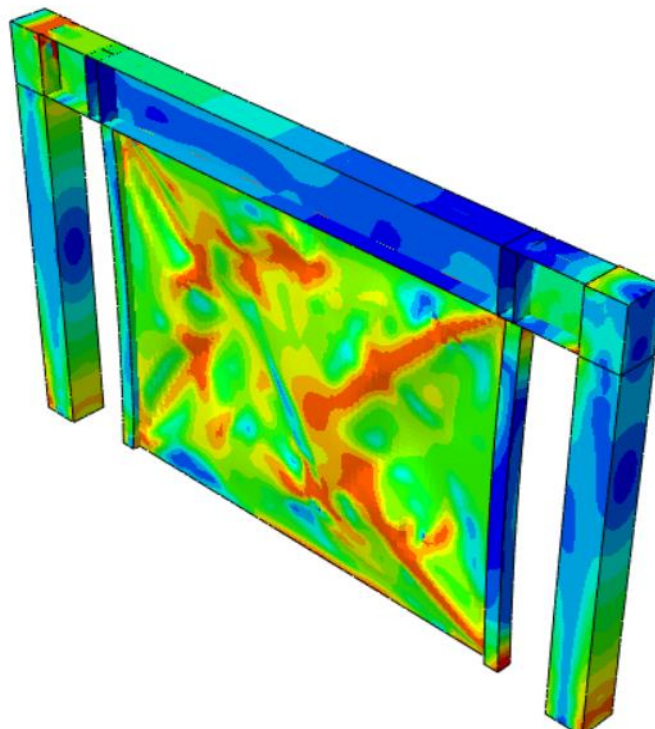
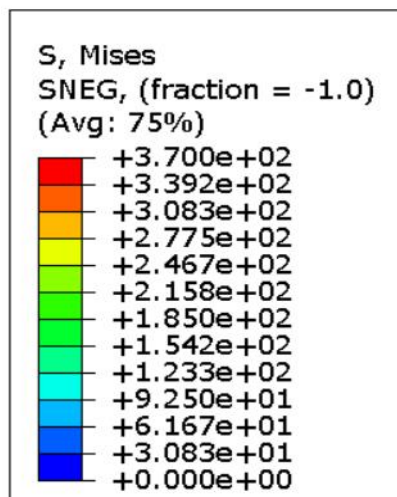
شکل ۳-۲۶- بدون سوراخ مدل H



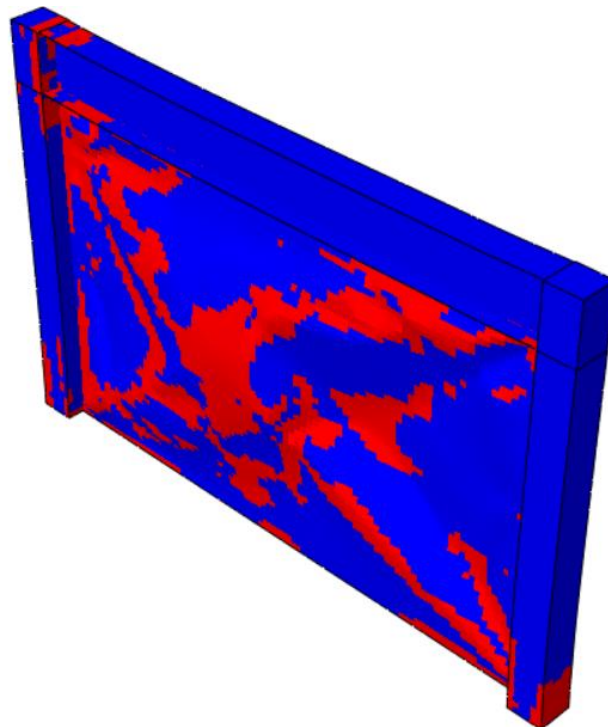
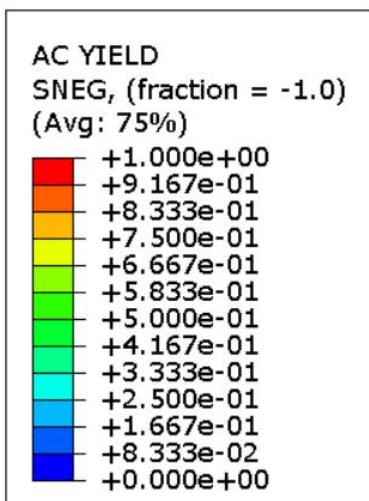
نتایج حاصل از تحلیل مدل های بدون سوراخ



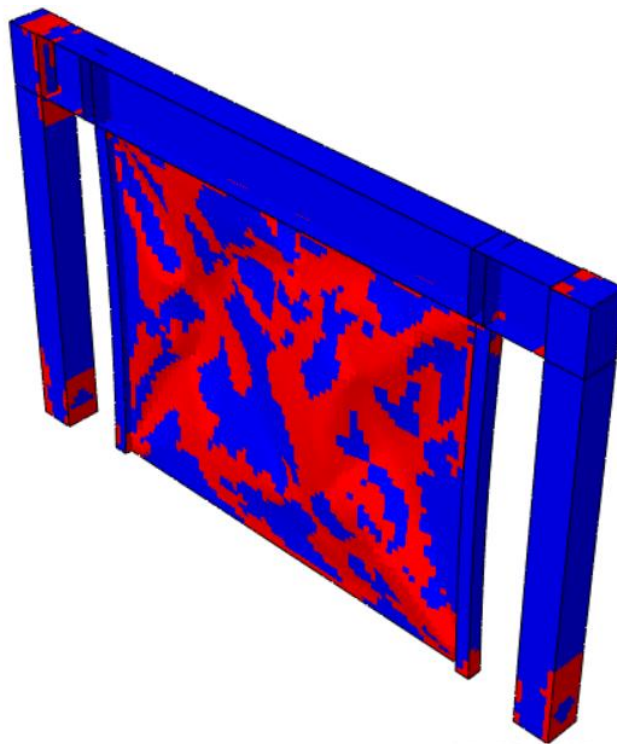
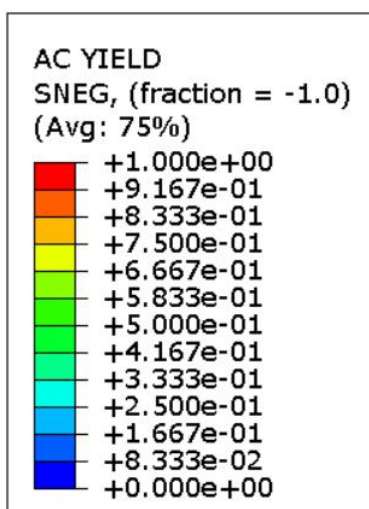
شکل (۴-۱): توزیع تنش در مدل دیوار برشی مقید



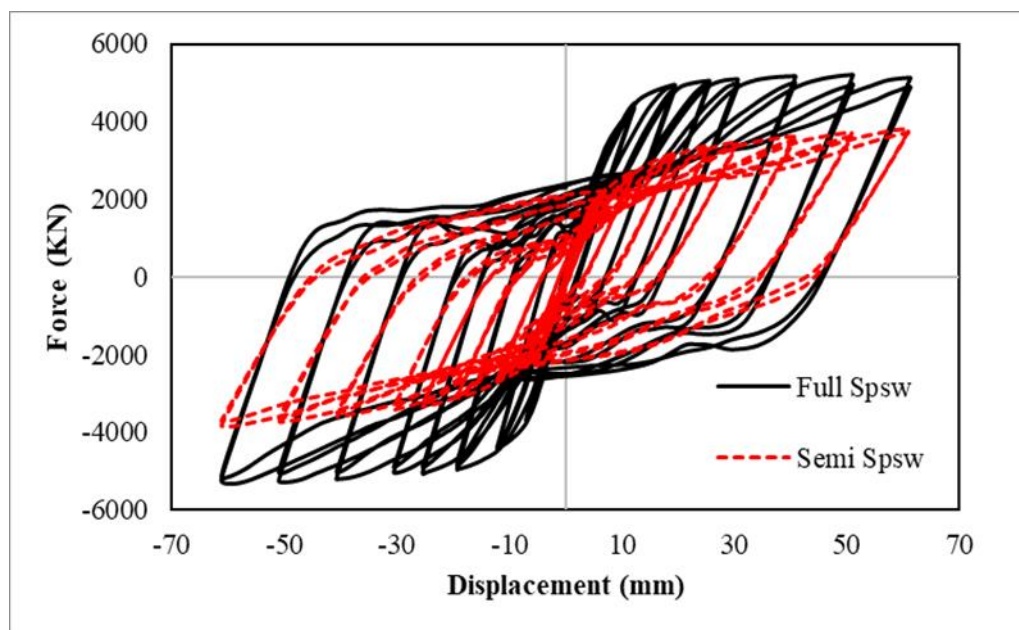
شکل (۴-۲): توزیع تنش در مدل دیوار برشی نیمه مقید



شکل (۴-۳): توزیع تسلیم فولاد در مدل دیوار برشی مقید



شکل (۴-۴): توزیع تسلیم فولاد در مدل دیوار برشی نیمه مقید



شکل (۴-۵): مقایسه منحنی هیستریزیس مدل دیوار برشی مقید و نیمه مقید