

## تاثیر بازشو بر سختی جانبی دیوارهای بنایی دارای کلاف بتنی و بدون کلاف

مسعود شفیعی ورزنه<sup>۱</sup>، فرهاد بهنام فر<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد عمران-سازه، اصفهان، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۸  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۵-۰۹  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۷-۰۶  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۱۰-۰۴

### کلمات کلیدی:

دیوار بنایی  
بازشو  
سختی جانبی  
المان محدود  
کلاف بتنی

**خلاصه:** یکی از سیستم های باربر ساختمانی متداول از سال های دور تا کنون، ساختمان با دیوار باربر بنایی می باشد. اگرچه این سیستم ساختمانی برای انتقال بارهای ثقلی مناسب می باشد ولی در صورتیکه بدون کلاف باشد برای تحمل بارهای جانبی مناسب نخواهد بود. به منظور بررسی وضعیت ساختمان های بنایی موجود نیاز است که بتوان مقاومت و سختی جانبی دیوارهای بنایی را محاسبه کرد. در دستورالعمل بهسازی ساختمان های موجود (نشریه ۳۶۰) روابطی جهت محاسبه سختی دیوار بنایی بدون کلاف و با استفاده از مدل های اجزاء محدود روابط محاسبه شده مورد ارزیابی قرار داده می شود. نمونه های انتخاب شده برای آزمون صحت سنجی شامل دو دیوار بنایی با کلاف های بتنی پیرامونی و یک دیوار بنایی بدون کلاف می باشند. از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس برای انجام تحلیل های غیرخطی عددی استفاده شده است. نتایج حاصله نشان می دهد وقتی نسبت سطح بازشو به سطح دیوار بزرگ بوده و مسابوی یک سوم است، خطای روابط تحلیلی به اوج خود می رسد. در این حالت ضریب اصلاح سختی بین ۱٫۵ تا ۳ تغییر می نماید. در چنین شرایطی مقدار ضریب اصلاح سختی به شدت به موقعیت بازشو در دیوار حساس می باشد. به طور کلی، هرچه موقعیت بازشو پایین تر باشد، دقت روابط تحلیلی بیشتر می شود که تا ۲ برابر هم می رسد. این نشان می دهد که دقت فرضیات تئوری مرتبه اول در این شرایط بیشتر است.

### ۱- مقدمه

بهتر می باشد. اگرچه احداث ساختمان های دارای اسکلت فولادی و بتنی در حال افزایش است اما هنوز هم بسیاری از ساختمان های موجود از نوع بنایی بوده و به دلیل عدم رعایت اصول و ضوابط فنی و علمی از ایمنی لازم برخوردار نیستند. برای سازه های بنایی برخلاف سازه های فولادی و بتنی، هنوز روش های مدل سازی کاربردی و قابل استفاده برای مهندسين، به ویژه در مورد دیوارهای بازشودار، ارائه نشده است. مطالعات زیادی برای کمی سازی رفتار دیوارهای بنایی صورت پذیرفته است که برخی نیز به نتایج مطلوب رسیده اند. در ادامه به برخی از مطالعات صورت گرفته در این زمینه اشاره شده است.

ساختمان های بنایی، از گذشته مورد استفاده قرار گرفته شده و همواره به عنوان اصلی ترین گزینه ساخت و ساز مورد توجه بوده است. یکی از اصلی ترین اجزای باربر ساختمان های بنایی دیوارهای باربر می باشند. ساختمان های مصالح بنایی بدون انجام محاسبات مهندسی ساخته می شوند. البته با توجه به آیین نامه های موجود، در آنها برخی اصول طراحی مقاوم لرزه ای از جمله استفاده از جزییات مناسب و کلافهای افقی و قائم رعایت می شود، در نتیجه رفتار آنها در برابر زلزله از ساختمان های مصالح بنایی سنتی (بدون کلاف) بسیار

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: farhad@cc.iut.ac.ir



ماکرو<sup>۵</sup>، میکرو<sup>۶</sup> و میکرووی اصلاح<sup>۷</sup> شده استفاده می شود. در مدل سازی به روش ماکرو، تمامی اجزای تشکیل دهنده مصالح بنایی به صورت پیوسته در نظر گرفته شده و کل حجم دیوار بنایی به صورت یک ماده همگن در نظر گرفته می شود. این روش در تحلیل جزئیات تنش ناتوان است و از آن برای تحلیل ساختارها در مقیاس بزرگ استفاده می شود. در روش مدل سازی میکرو آجرها و لایه های ملات بین آن ها و همچنین اندرکنش بین آجر و ملات به صورت متمایز مدل می شود. در روش میکرووی اصلاح شده، مدل سازی شبیه به مدل سازی میکرو است با این تفاوت که ضخامت ملات بین آجرها به بلوک آجر اضافه شده و به جای مدل کردن ملات بین آجرها خواص چسبندگی و مکانیکی آن را به فصل مشترک آجرها نسبت می دهند. روشهای مدل سازی میکرو و میکرووی اصلاح شده روش محاسباتی متمرکز بر ویژگیهای محلی هستند و به عوامل بسیار زیادی برای انجام تحلیل به این روشها نیاز است. در پژوهش حاضر جهت مدل سازی دیوارهای آجری بنایی از مدل ماکرو استفاده شده است و با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی در نرم افزار المان محدود<sup>۸</sup>، به بررسی مدل ها پرداخته شده است [۵].

## ۲-۲- صحت سنجی

در تحلیل های انجام شده در این مطالعه، به صورت کلی دو مدل از دیوارهای بنایی در نظر گرفته شده که شامل مدل های کلافدار و مدل های بدون کلاف می باشند. برای هر یک از این دو نوع، یک مدل آزمایشگاهی جهت صحت سنجی انتخاب شده است تا بتوان صحت مدل سازی دیوارهای بنایی بدون کلاف و دارای کلاف را بررسی کرد. در مطالعات مربوط به نمونه های آزمایشی انتخاب شده جهت صحت سنجی، اطلاعات رفتاری مناسب و کافی ارائه شده است. شکلهای (۱) و (۲) شماتیک کلی دو نمونه آزمایشگاهی انتخاب شده را نشان می دهند.

برای مدل کردن دیوار بنایی و کلاف بتنی از المان توپر سه بعدی<sup>۹</sup> و برای میلگرد های موجود در کلاف بتنی از المان یک بعدی<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. همچنین هماهنگ با مشخصات مصالح به کار رفته

کمارودین<sup>۱</sup> جهت محاسبه سختی درون صفحه ای دیوار برشی بنایی با بازشو، روشی را ارائه کرده است. وی دیوار را توسط تیرهایی شبیه سازی نموده است که تحت بار جانبی انعطاف پذیر می باشند و می توانند انتقال و چرخش نیز داشته باشند. با استفاده از این روش در ناحیه الاستیک خطی نتایج مناسبی به دست آمده است [۱]. شاریق<sup>۲</sup> و همکاران تاثیر بازشو در عملکرد لرزه ای دیوارهای بنایی را مورد مطالعه قرار داده و با مدل کردن انواع حالات استنباط نمودند که حداکثر تنش کششی در دیوارهای کوتاه تر و بیشینه تنش برشی در دیوارهای طولیتر رخ می دهد [۲]. کیورکی<sup>۳</sup> و همکاران روش های تقویت دیوارهای بنایی بازشودار را با استفاده از عناصر اضافی بتن مسلح را بررسی نموده و بر روی تعدادی دیوار بنایی آزمایشاتی انجام دادند. آزمایشات نشان داد که دیوارهای دارای بازشو که توسط المان های بتن مسلح تقویت شده اند ظرفیت برشی بیشتری نسبت به دیوارهای بدون بازشو دارند [۳]. عشقی و همکاران با انجام آزمایش بر روی نمونه هایی که از لحاظ ساختار و مصالح تشکیل دهنده شبیه به دیوارهای موجود بودند، روی دیوارهای متداول در ایران مطالعه آزمایشگاهی به عمل آوردند. با بررسی نتایج آزمایش های انجام شده و تحلیل های صورت گرفته، مقاومت ترک خوردگی، مقاومت جانبی نهایی، ظرفیت شکل پذیری و انرژی جذب شده نمونه ها تعیین گردید [۴]. گانز<sup>۴</sup> و همکاران مدل هایی از دیوار بنایی را تحت بارهای مختلف مورد آزمایش قرار دادند. ایشان همچنین به روش اجزاء محدود، نمونه های آزمایشگاهی را با استفاده از روش ماکرو مدل سازی و تحلیل کرده و در پایان نیز نتایج تحلیل را با نتایج حاصل از آزمایش مورد مقایسه قرار دادند [۵].

در پژوهش حاضر با تحلیل دیوارهای بازشودار بنایی، رابطه ای برای تعیین سختی جانبی آنها به کمک گراف ها و منحنی های حاصل از تحلیل عددی پیشنهاد شده است.

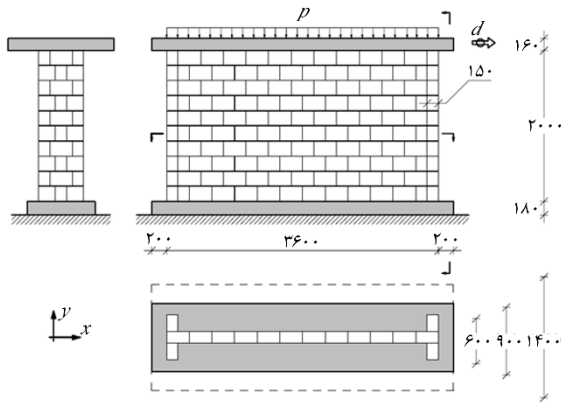
## ۲- مدل سازی و تحلیل

### ۲-۱- مقدمه

جهت مدل سازی دیوارهای بنایی از سه روش مدل سازی

5 Macromodeling  
6 Extensive micromodeling  
7 Simplified micromodeling  
8 Finite Element  
9 Solid  
10 Wire

1 Qamaruddin  
2 Shariq  
3 Kuroki  
4 Ganz



شکل ۲. ابعاد هندسی مدل آزمایشگاهی بدون کلاف [۷]

Fig. 2. Geometrical dimensions of the experimental model with no ties

جدول ۲. مدول الاستیسیته منشور بنایی مدل با کلاف [۶]

Table 2. Properties of the masonry units for the wall with no ties

مدول الاستیسیته (MPa)	تعداد آزمایش
۱۸۱	۱

جدول ۴. مدول ارتجاعی مصالح مدل بدون کلاف [۷]

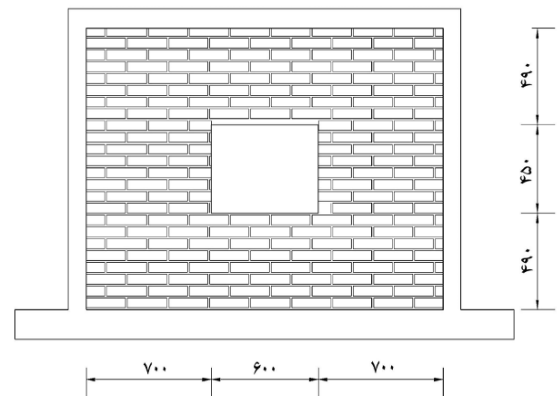
Table 4. The elasticity modulus for the components of the wall with no ties

مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون
۲۴۶۰	۰/۱۸

ارائه شده است.

همانگونه که دیده می شود، نتایج مدل سازی انطباق خوبی با آزمایشات در ناحیه خطی داشته و رفتار تا نقطه حداکثر مقاومت جانبی شبیه به منحنی حاصل از آزمایش می باشد. در ناحیه غیر خطی به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات کامل از منحنی های رفتاری مصالح مصرف شده در این دیوار و همچنین استفاده از مدل سازی ماکرو که اثرات ملات و فصل مشترک بین ملات و واحدهای بنایی را در نظر نمی گیرد، اختلاف بیشتری بین دو منحنی دیده شده و دقتی کمتر نسبت به ناحیه خطی موجود است. شکل (۵) الگوی کرنش خمیری دیوار در قسمت آجری را در لحظه ی رسیدن به مقاومت جانبی حداکثر نشان می دهد. همچنین شکل (۶) مربوط به الگوی ترک خوردگی نمونه اول پس از اتمام آزمایش می باشد.

در شکلهای فوق مشاهده می شود که در قسمت هایی که تحت تنش کششی بیشتر از حد قابل تحمل مصالح می باشد، کرنشی نیز



شکل ۱. ابعاد هندسی مدل آزمایشگاهی دارای کلاف [۶]

Fig. 1. Geometrical dimensions of the experimental model having ties

جدول ۱. مشخصات واحد بنایی برای مدل با کلاف [۵]

Table 1. Properties of the masonry units for the wall having ties

نمونه	تعداد آزمایش	مقاومت فشاری (MPa)	ضریب پراکندگی ( $C_p$ )
ملات	۸	۹/۶	۰/۱۲
منشور بنایی	۴	۱/۸	۰/۰۸

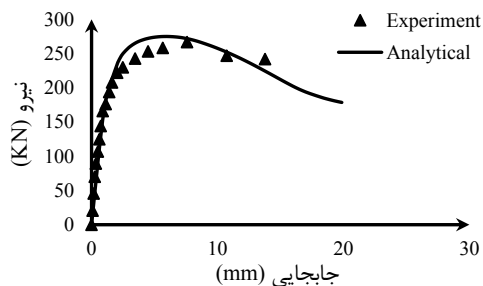
جدول ۳. مقاومت فشاری اجزای مدل بدون کلاف [۷]

Table 3. Compressive strengths for the components of the wall with no ties

نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
منشور بنایی	۱/۸۷	۰/۲۸

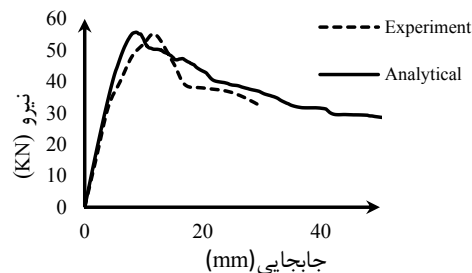
در نمونه های آزمایشگاهی، در مدل سازیها از مشخصات فولاد نرمه St37 و بتن با مقاومت ۲۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع استفاده شده است. برای انطباق شرایط مرزی مدل ساخته شده به روش اجزاء محدود با مدل آزمایشگاهی، در پای هر دو دیوار هر سه درجه انتقالی و چرخشی بسته شده درحالیکه در بالای دیوار فقط جابجایی در راستای عمود بر صفحه دیوار بسته شده است. بارگذاری نمونه ها نیز به صورت اعمال جابجایی افقی افزایشی درون صفحه دیوار می باشد. اعمال جابجایی تا زمانی ادامه می یابد که با افزایش جابجایی افقی، در مقاومت جانبی دیوار تغییر محسوسی مشاهده نشود. مشخصات مصالح به کار رفته در مدل های آزمایشگاهی و عددی در جداول (۱) تا (۴) آورده شده است.

در شکلهای (۳) و (۴) مقایسه بین منحنی های نیرو-جابجایی مدل های آزمایشگاهی با مدل های اجزاء محدود مربوط به هر کدام



شکل ۴. مقایسه منحنی نیرو-جابجایی مدل آزمایشگاهی بدون کلاف با مدل اجزاءمحدود

Fig. 4. Comparison of the load-displacement curve of the experimental model of the wall with no ties with that of the finite element analysis



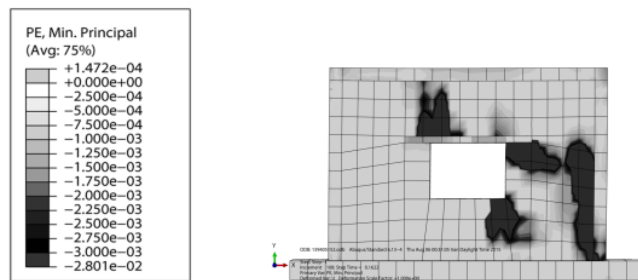
شکل ۳. مقایسه منحنی نیرو-جابجایی مدل آزمایشگاهی دارای کلاف با مدل اجزاء محدود

Fig. 3. Comparison of the load-displacement curve of the experimental model of the wall having ties with that of the finite element analysis



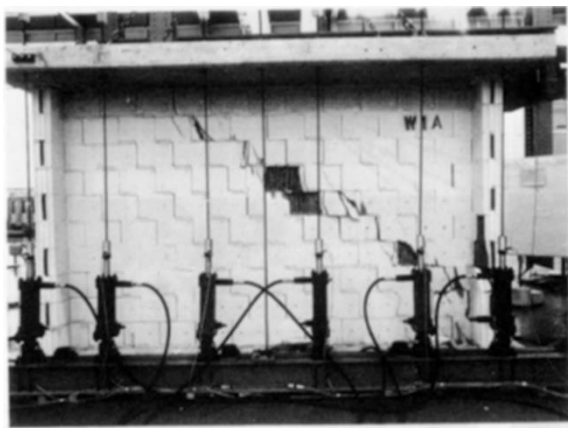
شکل ۶. تصویر نمونه دارای کلاف پس از اتمام آزمایش [۶]

Fig. 6. Picture of the wall sample having ties after termination of test



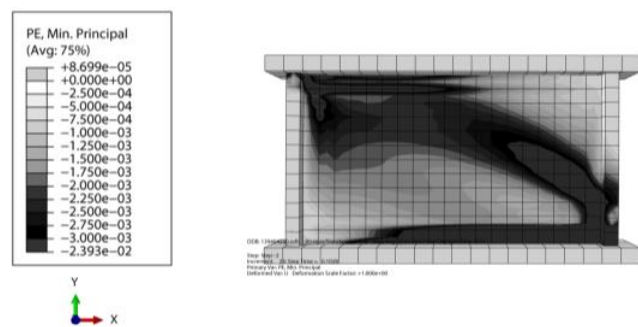
شکل ۵. کرنش خمیری در قسمت آجری نمونه دارای کلاف

Fig. 5. Plastic strain at the brick part of the wall having ties



شکل ۸. تصویر نمونه بدون کلاف پس از اتمام آزمایش [۷]

Fig. 8. Picture of the wall sample with no ties after termination of test



شکل ۷. کرنش خمیری در قسمت آجری نمونه بدون کلاف

Fig. 7. Plastic strain at the brick part of the wall with no ties

دیوار تحت کشش به حد تسلیم خود می رسد. این موضوع، خود یک دلیل دیگر جهت اختلاف بین دو منحنی آزمایشگاهی و منحنی اجزاءمحدود می باشد.

همانطور که در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می شود، همانند نمونه اول، خطوط تراز کرنش خمیری با محدوده ی ترک خوردگی

بیشتر از حداکثر کرنش کششی تعریف شده برای مصالح بنایی در مدل تحلیلی به وجود آمده است. این نواحی در محدوده ترک خوردگی در مدل آزمایشگاهی قرار دارند. ترک خوردگی از گوشه بالای بازشو شروع شده و به گوشه پایین دیوار رسیده است که این روند در محمی تر کرنش خمیری نیز مشاهده می شود. چون سازه ز لحاظ هندسی متقارن می باشد، در مدل آزمایشگاهی تحت بار رفت و برگشتی در دو طرف بازشو ترک خوردگی مشابه دیده می شود. ولی در مدل اجزاء محدود به دلیل وارد کردن بار به صورت یک طرفه، فقط یک طرف

$\nu$  نیروی برشی وارد بر دیوار،  $G$  مدول برشی،  $A_s$  سطح مقطع دیوار،  $M$  لنگر خمشی وارد بر دیوار،  $E$  مدول ارتجاعی و  $I$  ممان اینرسی دیوار می باشد.

دیوار برشی بنایی دو عملکرد برشی و خمشی دارد که هر دوی این عملکردها در محاسبات مدنظر قرار گرفته است. با توجه به شکل (۹)، پارامترهای رابطه (۱) به صورت زیر می باشند:

$$A_s = \frac{5}{6}bt \quad (2)$$

$$I = \frac{tb^3}{12} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

در روابط فوق،  $t$  ضخامت دیوار،  $b$  طول دیوار و  $\nu$  نسبت پواسون<sup>۱</sup> می باشد.

اگر نیروی جانبی وارد بر دیوار  $P$  فرض شود، با توجه به منحنی های برش و لنگر در ارتفاع دیوار که در شکل (۹) نشان داده شده، تابع برش و لنگر در ارتفاع دیوار به صورت زیر می باشد:

$$V_x = P \quad (5)$$

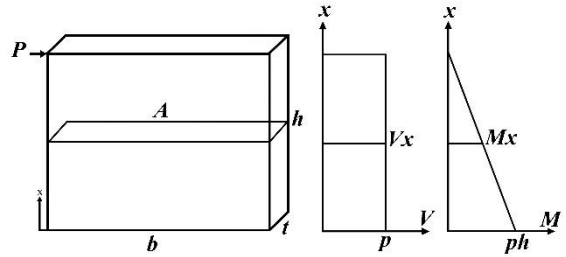
$$M_x = P(h-x) \quad (6)$$

با استفاده از رابطه (۱) و جایگذاری مقادیر محاسبه شده در آن، روابط به صورت زیر خواهد شد:

$$U = \int_0^h \frac{P^2}{2GA_s} dx + \int_0^h \frac{(P(h-x))^2}{2EI} dx \quad (7)$$

$$U = \underbrace{\frac{6P^2h(1+\nu)}{5Ebt}}_{\text{سهم برش}} + \underbrace{\frac{2P^2h^3}{Eb^3t}}_{\text{سهم خمش}} \quad (8)$$

با استفاده از قضیه کاستیگلیانو<sup>۲</sup> می توان از رابطه انرژی نسبت به نیرو مشتق گرفت و جابجایی در راستای نیرو،  $\Delta$ ، را به صورت زیر



شکل ۹. شماتیک کلی از یک دیوار بنایی و تلاش های ایجاد شده در ارتفاع دیوار

Fig. 9. Schematic view of a masonry wall and distribution of internal actions along its height

قسمت آجری در انتهای آزمایش مطابقت خوبی دارد که این خود نشان دهنده دقت مدل سازی اجزاء محدود در این مطالعه می باشد.

### ۳- سختی جانبی دیوار بنایی

#### ۳-۱- مقدمه

سختی جانبی دیوار بنایی بدون بازشو و بدون کلاف در آیین نامه های مختلف ارائه شده اما در مورد محاسبه سختی جانبی دیوار بنایی دارای بازشو مطلبی ارائه نشده است. در این بخش ابتدا با استفاده از روابط مقاومت مصالح و تحلیل سازه ها، سختی جانبی دیوار بنایی بدون بازشو محاسبه شده و سپس با تعمیم روابط محاسبه شده، سختی جانبی دیوار بنایی دارای بازشو محاسبه می گردد. همچنین سختی کلاف بتنی دور دیوار بنایی به صورت مجزا محاسبه شده و بسته به مورد به دیوار اضافه می گردد. پس از آن مقادیر حاصل از روابط تحلیلی با مقادیر به دست آمده از محاسبات عددی (مشابه بند ۲-۲) مقایسه شده و در انتها ضریب تصحیحی ارائه می گردد.

#### ۳-۲- سختی دیوار بنایی بدون بازشو

برای محاسبه سختی از روش انرژی استفاده می شود. به این منظور انرژی کرنشی ذخیره شده در دیوار بنایی از رابطه (۱) محاسبه می گردد:

$$U = \int_0^h \frac{v(x)^2}{2GA_s} dx + \int_0^h \frac{M^2}{2EI} dx \quad (1)$$

در رابطه فوق  $U$  انرژی ذخیره شده در دیوار،  $h$  ارتفاع دیوار،

1 Poisson's Ratio

2 Castigliano

صورت زیر محاسبه می شوند:

$$U_I = \frac{P^2 h_1 b^2 (1+\nu)}{10EI_w} + \frac{P^2}{2EI_w} \left( h^2 h_1 + \frac{h_1^3}{3} - h h_1^2 \right) \quad (14)$$

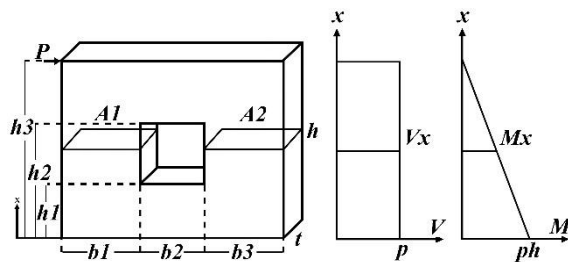
$$U_{II} = \frac{P^2 b^3 b_1 (1+\nu)}{10EI_w (b_1 + b_3)^2} (h_2 - h_1) + \frac{P^2 b^3 b_3 (1+\nu)}{10EI_w (b_1 + b_3)^2} (h_2 - h_1) + \frac{P^2}{2EI_{op}} \left[ \left( h^2 h_2 + \frac{h_2^3}{3} - h h_2^2 \right) - \left( h^2 h_1 + \frac{h_1^3}{3} - h h_1^2 \right) \right] \quad (15)$$

$$U_{III} = \frac{P^2 b^2 (1+\nu)}{10EI_w} (h_3 - h_2) + \frac{P^2}{2EI_w} \left[ \left( h^2 h_3 + \frac{h_3^3}{3} - h h_3^2 \right) - \left( h^2 h_2 + \frac{h_2^3}{3} - h h_2^2 \right) \right] \quad (16)$$

در روابط فوق  $U_I$  انرژی جذب شده توسط قسمت پایینی دیوار،  $U_{II}$  انرژی جذب شده توسط قسمت میانی دیوار،  $U_{III}$  انرژی جذب شده توسط قسمت بالایی دیوار،  $h_1$  ارتفاع پایین بازشو و  $h_2$  ارتفاع بالای بازشو از پای دیوار،  $h_3$  ارتفاع کل دیوار،  $I_w$  ممان اینرسی دیوار،  $I_{op}$  ممان اینرسی دیوار در قسمتی که بازشو حضور دارد،  $E$  مدول الاستیسیته دیوار و  $\nu$  ضریب پواسون دیوار بنایی می باشد. جهت ساده تر شدن محاسبات،  $\alpha_1$ ،  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  به ترتیب جایگزین  $\frac{h_1}{h}$ ،  $\frac{h_2}{h}$  و  $\frac{h_3}{h}$  می گردند. سپس:

$$U = \frac{P^2 b^2 (1+\nu)}{10EI_w} \left( h - h_{op} + \frac{b h_{op}}{b - b_{op}} \right) + \left. \begin{aligned} & \frac{1}{I_w} [h_1 (3 + \alpha_1^2 - 3\alpha_1)] + \\ & \frac{1}{I_{op}} [h_2 (3 + \alpha_2^2 - 3\alpha_2) - h_1 (3 + \alpha_1^2 - 3\alpha_1)] + \\ & \frac{1}{I_w} [h_3 (3 + \alpha_3^2 - 3\alpha_3) - h_2 (3 + \alpha_2^2 - 3\alpha_2)] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

با توجه به رابطه (۱۱)، می توان سختی دیوار بنایی بازشودار را مطابق رابطه (۱۸) محاسبه کرد:



شکل ۱۰. شماتیک کلی از یک دیوار بنایی دارای بازشو و تلاش های ایجاد شده در ارتفاع دیوار

Fig. 10. Schematic view of a masonry wall having an opening and distribution of internal actions along its height

محاسبه کرد:

$$\Delta = \frac{\partial U}{\partial P} \quad (9)$$

$$\Delta = \frac{12Ph(1+\nu)}{5Ebt} + \frac{4Ph^3}{Eb^3t} \quad (10)$$

سختی دیوار برشی بدون بازشو،  $K$ ، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad (11)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{12h(1+\nu)}{5Ebt} + \frac{4h^3}{Eb^3t} \quad (12)$$

$$K = \frac{3EI}{\beta h^3}, \beta = 1 + 0.6 \left( \frac{b}{h} \right)^2 (1+\nu) \quad (13)$$

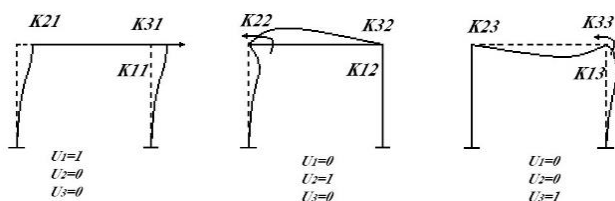
در نشریه FEMA356 همین رابطه برای محاسبه سختی دیوار بنایی با احتساب مقدار ۰/۲۵ برای  $\nu$  در آن ارائه شده است [۸].

### ۳-۳- سختی دیوار بنایی دارای بازشو

یک دیوار بنایی بازشودار به طور کلی در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

با تقسیم کردن دیوار به سه قسمت، برای محاسبه سختی، سه رابطه محاسبه شده است که روابط مربوط به برش و روابط مربوط به خمش به صورت جداگانه بسط داده شده و سپس با یکدیگر جمع زده می شوند. با توجه به شکل (۱۰) معادلات انرژیهای خمشی و برشی به





شکل ۱۲. شماتیک تغییرشکل کلاف با توجه به هر یک از حالات درجه آزادی

Fig. 12. Schematic view of the tie system deformations at each of its degrees of freedom

$$F = K\Delta \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} f_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{EI}{h^3} \begin{bmatrix} 24 & 6h & 6h \\ 6h & 4h^2 + \frac{4h^3}{L} & \frac{2h^3}{L} \\ 6h & \frac{2h^3}{L} & 4h^2 + \frac{4h^3}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 = \Delta_x \\ U_2 = M_2 \\ U_3 = M_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

با حل معادله فوق، رابطه زیر حاصل می شود:

$$U_2 = U_3 = \frac{-6h}{4h^2 + \frac{6h^3}{L}} U_1 \quad (22)$$

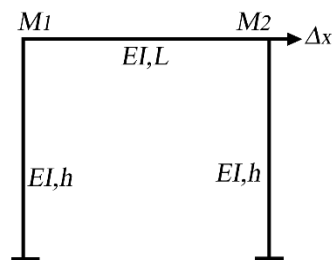
با توجه به سطر اول معادله (۲۱):

$$f_s = \frac{EI}{h^3} \left( 24 + 2 \times 6h \left( \frac{-6h}{4h^2 + \frac{6h^3}{L}} \right) \right) \Delta_x \quad (23)$$

$$K = \left( 24 - \left( \frac{36h^2}{2h^2 + \frac{3h^3}{L}} \right) \right) \frac{EI}{h} \quad (24)$$

از آنجایی که کلاف دور دیوار عملکرد خمشی دارد، ضریب ترک خوردگی مقاطع بتنی برابر ۰/۳ نیز اعمال می گردد. در نهایت سختی کلاف بتنی دور دیوار بنایی مطابق رابطه (۲۵) به دست می آید:

$$K = \left( 24 - \left( \frac{36h^2}{2h^2 + \frac{3h^3}{L}} \right) \right) \frac{0.3EI}{h} \quad (25)$$



شکل ۱۱. شماتیک کلاف و درجات آزادی مربوط به آن

Fig. 11. Schematic view of the tie system and its degrees of freedom

$$\frac{1}{K} = \frac{b^2(1+\nu)}{5EI_w} \left( h - h_{op} + \frac{bh_{op}}{b-b_{op}} \right) + \frac{h^2}{3E} \left[ \left( \frac{h_1}{I_w} - \frac{h_1}{I_{op}} \right) (3 + \alpha_1^2 - 3\alpha_1) + \left( \frac{h_2}{I_w} - \frac{h_2}{I_{op}} \right) (3 + \alpha_2^2 - 3\alpha_2) + \frac{h_3}{I_w} \right] \quad (18)$$

### ۳-۳- سختی کلاف بتنی

از آنجایی که جابجایی کلاف و دیوار در بالاترین نقطه دیوار با یکدیگر برابر است، سختی دیوار بنایی کلافدار را می توان از رابطه فنرهای موازی به دست آورد. برای محاسبه سختی مربوط به کلاف بتنی، این کلاف طبق شکل (۱۱) شبیه به یک قاب بتنی فرض شده و از طریق تشکیل ماتریس سختی به حل مسئله پرداخته می شود. با توجه به شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، کلاف بتنی مورد نظر دارای سه درجه آزادی است که ماتریس سختی آن یک ماتریس ۳×۳ طبق رابطه (۱۹) می باشد:

$$k = \begin{bmatrix} \frac{24EI}{h^3} & \frac{6EI}{h^2} & \frac{6EI}{h} \\ \frac{6EI}{h} & \frac{4EI}{h} + \frac{4EI}{L} & \frac{2EI}{L} \\ \frac{6EI}{h} & \frac{2EI}{L} & \frac{4EI}{h} + \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (19)$$

با استفاده از رابطه سختی و همچنین نحوه اعمال بار به کلاف معادله زیر را می توان نوشت:

جدول ۵. ابعاد هندسی بازشو

Table 5. Geometrical dimensions of the opening

نسبت سطح بازشو به سطح دیوار	طول بازشو (متر)	ارتفاع بازشو (متر)
1/3	2.887	1.732
1/4	2.5	1.5
1/6	2.04	1.23

شده در دیوار قرار دارد.

ابعاد بازشو ها متناسب با ابعاد دیوار در نظر گرفته شده است که مطابق جدول زیر می باشد.

در جدول زیر مشخصات هندسی بازشوی دیوار در تمامی مدل ها ارائه شده است.

#### ۴-۲- مدل های دارای کلاف

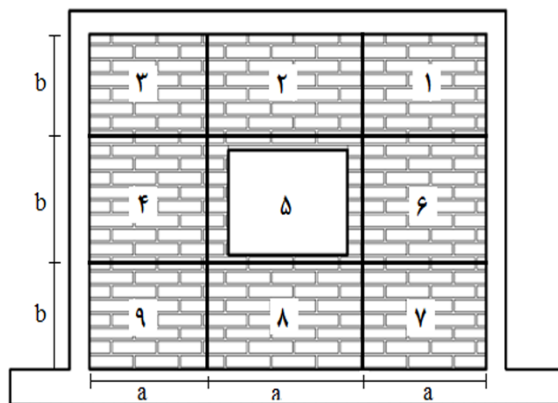
سختی دیوار کلافدار یک بار با استفاده از روابط تحلیلی بالا (عکس رابطه ۱۸ به علاوه رابطه ۲۵) و یک بار با تحلیل اجزاء محدود به دست می آید. نسبت اختلاف این دو مقدار به مقدار حاصل از تحلیل اجزاء محدود، ضریب  $\beta_1$  نامیده می شود. این ضریب بعدا برای اصلاح مقدار حاصل از روابط تحلیلی به کار گرفته خواهد شد.

شکل (۱۴)، منحنی تغییرات  $\beta_1$  را نشان می دهد.

با توجه به شکل (۱۴)، هرچقدر که نسبت سطح بازشو به سطح دیوار کاهش می یابد مقدار  $\beta_1$  نیز کوچکتر می شود. در نتیجه، هرچه نسبت سطح بازشو کمتر باشد دقت روابط تحلیلی بیشتر می شود. این موضوع از نظر فیزیکی به آن معنی است که روابط تحلیلی موجود برای دیوارهای بدون بازشو قابل اعتماد بوده و از دقت کافی برخوردارند. این در حالی است که در صورت وجود بازشواستفاده از تئری مرتبه اول تیرها طبق رابطه (۱) همراه با خطایی خواهد بود که در مقادیر  $\beta_1$  منعکس شده است. هرچه بازشو بزرگتر باشد، خطای استفاده از نظریه مزبور هم بیشتر خواهد بود.

شکل پراکندگی نقاط و منحنی های برازش شده روی آنها در شکل (۱۴) نشان دهنده وجود یک رابطه کمابیش درجه سه بین داده ها می باشد. روابط منحنی های برازش شده به صورت زیر است:

$$R^2 = 0.77 \quad \beta_1 = -0.318x^3 + 0.4924x^2 + 4.8078 \quad (26)$$



شکل ۱۳. نحوه شماره گذاری ناحیه های داخل دیوار بنایی

Fig. 13. Possible locations of the opening (locations 1-9)

#### ۴- مطالعات عددی

با توجه به ارتفاع رایج سقف طبقات در ایران ارتفاع مدل های محاسباتی برابر ۳ متر در نظر گرفته شده است. ضخامت دیوار برابر ۳۰ سانتی متر و طول دیوار بنایی برابر ۵ متر در نظر گرفته شده است.

بار ثقلی اعمالی به دیوار که شامل بار مرده و زنده می باشد، با چشمه برابر ۴ متر در دو طرف دیوار در نظر گرفته شده که برابر ۲ تن بر متر به صورت خطی بر دیوار اعمال شده است. مطابق با دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های بنایی غیر مسلح موجود، نقطه پایانی هر منحنی نیرو-جابجایی، برابر ۶۰ درصد حداکثر نیروی وارد بر دیوار در نظر گرفته می شود [۹].

#### ۴-۱- معرفی مدل ها

جهت دسته بندی مدل سازی ها، نام گذاری خاصی برای هر مدل در نظر گرفته می شود. مدل های مورد مطالعه به دو دسته کلی با کلاف و بدون کلاف تفکیک شده است. در نام گذاری محصور بودن مدل با حرف C مشخص شده و حرف O نمایان گر وجود بازشو در دیوار بنایی است. نسبت سطح بازشو به سطح دیوار نیز در قسمت دوم نام مدل آورده شده است. در قسمت سوم، شماره موقعیت قرارگیری بازشو در دیوار آورده شده است. به این ترتیب، 01-3/CMOW-1 یعنی مدل مورد نظر یک دیوار بنایی محصور شده دارای کلاف و دارای بازشو می باشد که نسبت مساحت بازشو به مساحت دیوار برابر  $\frac{1}{3}$  است و بازشو با توجه به شکل (۱۳) در ناحیه ۱، از ۹ ناحیه تعریف



جدول ۶. موقعیت قرارگیری بازشو در دیوار.  
Table 6. Location of the opening on the wall

فاصله قائم بازشو از بالای دیوار (m)	فاصله افقی بازشو از بر دیوار (m)	نام مدل با کلاف	نام مدل بدون کلاف
0.5	1.36	CMOW-1/3-01	MOW-1/3-01
0.5	1.05	CMOW-1/3-02	MOW-1/3-02
0.5	0.75	CMOW-1/3-03	MOW-1/3-03
0.63	0.75	CMOW-1/3-04	MOW-1/3-04
0.63	1.05	CMOW-1/3-05	MOW-1/3-05
0.63	1.36	CMOW-1/3-06	MOW-1/3-06
0.76	1.36	CMOW-1/3-07	MOW-1/3-07
0.76	1.05	CMOW-1/3-08	MOW-1/3-08
0.76	0.75	CMOW-1/3-09	MOW-1/3-09
0.5	1.75	CMOW-1/4-01	MOW-1/4-01
0.5	1.25	CMOW-1/4-02	MOW-1/4-02
0.5	0.75	CMOW-1/4-03	MOW-1/4-03
0.75	0.75	CMOW-1/4-04	MOW-1/4-04
0.75	1.25	CMOW-1/4-05	MOW-1/4-05
0.75	1.75	CMOW-1/4-06	MOW-1/4-06
1	1.75	CMOW-1/4-07	MOW-1/4-07
1	1.25	CMOW-1/4-08	MOW-1/4-08
1	0.75	CMOW-1/4-09	MOW-1/4-09
0.5	1.96	CMOW-1/6-01	MOW-1/6-01
0.5	1.48	CMOW-1/6-02	MOW-1/6-02
0.5	1	CMOW-1/6-03	MOW-1/6-03
0.885	1	CMOW-1/6-04	MOW-1/6-04
0.885	1.48	CMOW-1/6-05	MOW-1/6-05
0.885	1.96	CMOW-1/6-06	MOW-1/6-06
1.27	1.96	CMOW-1/6-07	MOW-1/6-07
1.27	1.48	CMOW-1/6-08	MOW-1/6-08
1.27	1	CMOW-1/6-09	MOW-1/6-09

$$\beta_1 = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (29)$$

جهت تعیین رابطه بین ضرایب موجود در رابطه (۲۹) با نسبت سطح بازشو به سطح دیوار از شکل (۱۵) استفاده می شود. با برازش منحنی هایی بر این ضرایب می توان روابط مربوط به ضرایب  $\beta_1$  را به صورت زیر نوشت.

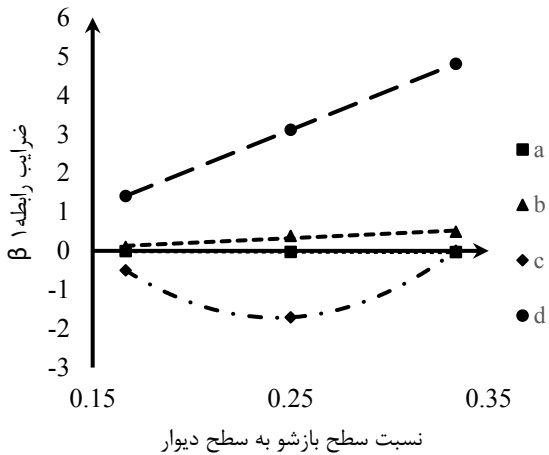
$$a = -0.1536\gamma + 0.0172 \text{ و } R^2 = 0.92 \quad (30)$$

$$b = 2.3598\gamma - 0.2642 \text{ و } R^2 = 0.93 \quad (31)$$

$$\frac{A_{op}}{A_w} = \frac{1}{4}: \beta_1 = -0.0255x^3 + 0.3858x^2 - 1.7078x + 3.1138 \text{ و } R^2 = 0.75 \quad (27)$$

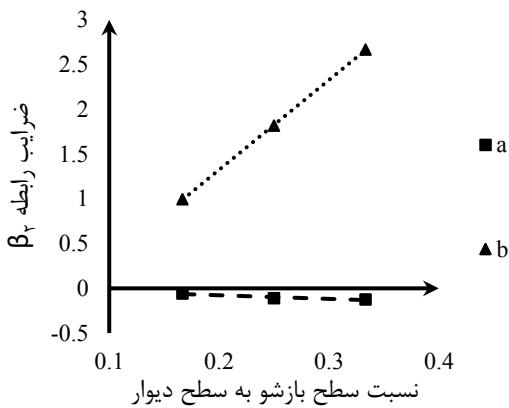
$$\frac{A_{op}}{A_w} = \frac{1}{6}: \beta_1 = -0.0062x^3 + 0.0991x^2 - 0.5014x + 1.4083 \text{ و } R^2 = 0.78 \quad (28)$$

$x$  شماره موقعیت بازشو طبق شکل (۱۳) را نشان می دهد. بنابراین به طور کلی می توان رابطه  $\beta_1$  را به صورت معادله درجه سه طبق رابطه (۲۹) برحسب موقعیت بازشو در دیوار نوشت. ضرایب این رابطه با توجه به شکل (۱۴) و معادلات (۲۶-۲۸) می توانند با نسبت سطح بازشو به سطح دیوار رابطه داشته باشند.



شکل ۱۵. منحنی های حاصل برای ضرایب رابطه  $\beta_1$

Fig. 15. Curves obtained for the coefficients of the equation for  $\beta_1$



شکل ۱۷. خطوط درون یابی شده بین ضرایب رابطه  $\beta_2$

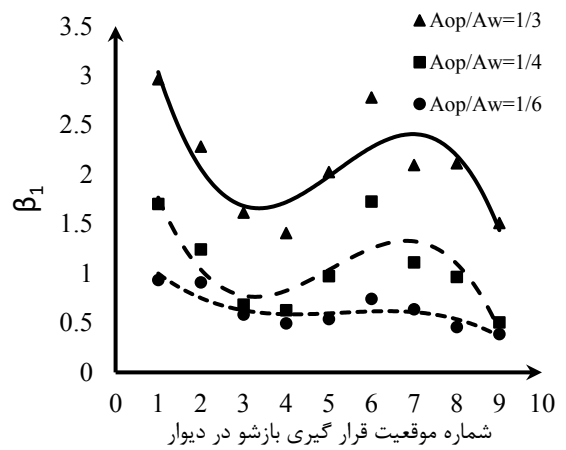
Fig. 17. Lines interpolated between coefficients of  $\beta_1$

قبل عمل کرد. ضریب اصلاح در این مورد  $\beta_2$  نامیده می شود. ابتدا نمودار  $\beta_2$  (شکل ۱۶) ترسیم شده و با توجه به برازش انجام شده، معادله ای جبری برای در مورد این گروه از دیوارهای بنایی به دست خواهد آمد.

با توجه به شکل (۱۶) می توان رابطه ای برای  $\beta_2$  به دست آورد. با توجه به خطوط برازش شده می توان گفت که یک رابطه درجه یک بین داده ها برقرار است. روابط منحنی های برازش شده به صورت زیر است.

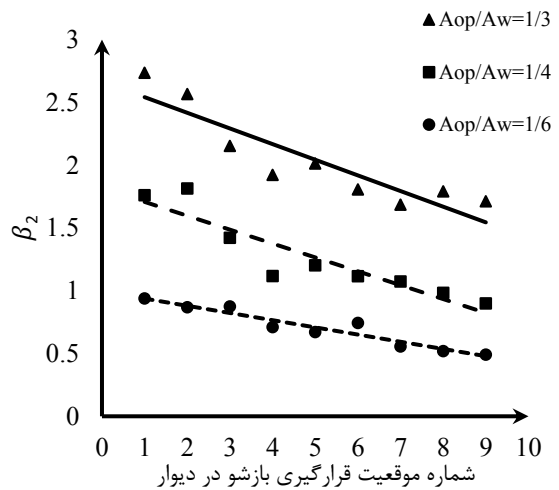
$$\frac{A_{op}}{A_w} = \frac{1}{3} : \beta_2 = -0.1246x + 2.666, R^2 = 0.82 \quad (34)$$

$$\frac{A_{op}}{A_w} = \frac{1}{4} : \beta_2 = -0.1105x + 1.8178, R^2 = 0.84 \quad (35)$$



شکل ۱۴. تغییرات  $\beta_1$  برای دیوار کلافدار دارای بازشو.

Fig. 14. Variation of  $\beta_1$  for the tied wall with opening



شکل ۱۶. نمودار برای دیوار بازشودار بدون کلاف

Fig. 16. Diagram for the non-tied wall with opening

$$c = 209.82\gamma^2 - 101.9\gamma + 10.654 \text{ و } R^2 = 1 \quad (32)$$

$$d = 20.397\gamma - 1.9893 \text{ و } R^2 = 1 \quad (33)$$

در روابط فوق  $\gamma$  نسبت سطح بازشو به سطح دیوار می باشد. روابط فوق در محدوده  $\frac{1}{3} \leq \gamma \leq \frac{1}{4}$  قابل کاربرد است. از آنجایی که در مقادیر  $\gamma$  کمتر از  $\frac{1}{6}$ ،  $\beta_1$  به یک مقدار حدی میل می کند، می توان از مقدار  $\frac{1}{4}$  برای  $\beta_1$  در این محدوده استفاده کرد.

### ۴-۳- مدل های بدون کلاف

برای دیوار بنایی بازشودار بدون کلاف نیز می توان مطابق با شیوه

کلاف با استفاده از روابط تحلیلی به دست آمده و با به کارگیری روش اجزاء محدود اصلاح شد. از این تحقیق نتایج زیر حاصل گردید:

۱- وقتی نسبت سطح بازشو به سطح دیوار بزرگ بوده و مساوی یک سوم است، خطای روابط تحلیلی به اوج خود می رسد. در این حالت ضریب اصلاح سختی بین ۱٫۵ تا ۳ تغییر می نماید.

۲- در مورد بازشوه‌های کوچکتر، در حالتیکه نسبت سطح بازشو بزرگتر از یک ششم نیست، مقدار ضریب اصلاح سختی از یک بیشتر نمی شود.

۳- در حالتیکه نسبت سطح بازشو بزرگ است، مقدار ضریب اصلاح سختی به شدت به موقعیت بازشو در دیوار حساس می باشد. هرچه بازشو کوچکتر باشد، این حساسیت کمتر می شود.

۴- به طور کلی، هرچه موقعیت بازشو پایین تر باشد، دقت روابط تحلیلی بیشتر می شود. این نشان می دهد که دقت فرضیات تئوری مرتبه اول تیرها در این شرایط بیشتر است.

۵- دقت روابط تحلیلی در مورد دیوارهای کلافدار بیشتر است. در این حالت مقدار ضریب اصلاح سختی نیز حساسیت کمتری نسبت به محل بازشو دارد. این موضوع نشان می دهد منشا خطا عمدتاً فرضیات پایه روابط مربوط به خود دیوار است نه کلاف، که تایید کننده دقت کمتر تئوری مرتبه اول برای دیوار است.

### مراجع

- [1] Qamaruddin; M. ;“In-plane stiffness of shear walls with openings”; Building and Environment, 34, 1999, 109-127.
- [2] Shariq; M. Abbasi; H. Irtaza; H. & Qamaruddin; M; “Influence of Openings on Seismic Performance of Masonry Building Walls”; Building and Environment , 43, 2008, 1232-1240.
- [3] Kuroki; M. Kikuchi; K. Nonaka; H. Shimosako; M.; “Experimental Study on Reinforcing Methods using Extra RC Elements for Confined Masonry Walls with Openings”; 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012, 2-5.
- [4] Sarrafi; B., Eshghi; S., “Experimental Study on Lateral Strength of Confined Masonry Walls”; 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, 2012, 2-7.

$$\frac{A_{op}}{A_w} = \frac{1}{6} : \beta_2 = -0.0573x + 0.9945, R^2 = 0.92 \quad (36)$$

بنابراین رابطه پیشنهادی برای  $\beta_2$  به صورت یک معادله خطی مطابق با رابطه (۳۷) پیشنهاد می شود.

$$\beta_2 = ax + b \quad (37)$$

جهت محاسبه روابط ضرایب  $a$  و  $b$  باید بین ضرایب به دست آمده از شکل (۱۶) طبق شکل (۱۷) برازش منحنی انجام شود. طبق شکل (۱۷)، با برازش منحنی هایی بر داده های این ضرایب می توان روابط مربوطه را به صورت زیر نوشت.

$$a = -0.4038\gamma + 0.0035 \text{ و } R^2 = 0.90 \quad (38)$$

$$b = 10.029\gamma - 0.6812 \text{ و } R^2 = 1 \quad (39)$$

در روابط فوق  $\gamma$  نسبت سطح بازشو به سطح دیوار می باشد. مشابه  $\beta_1$  روابط فوق فقط در محدوده  $\frac{1}{6} \leq \gamma \leq \frac{1}{3}$  قابل کاربردند. در مقادیر کمتر از  $\frac{1}{6}$ ،  $\beta_2$  به یک مقدار حدی نزدیک می شود. در این محدوده می توان از مقدار  $0.4$  برای  $\beta_2$  استفاده کرد.

### ۴-۴- سختی اصلاح شده

با توجه به بندهای قبلی، سختی حاصل از روابط تحلیلی به صورت زیر قابل اصلاح است:

$$K_1 = \frac{K_{wall} + K_{tie}}{1 + \beta_1} \quad (40)$$

$$K_2 = \frac{K_{wall}}{1 + \beta_2} \quad (41)$$

که در آن  $K_{wall}$  سختی دیوار بازشودار حاصل از رابطه (۱۸)،  $K_{tie}$  سختی کلاف طبق رابطه (۲۵) و  $K_2$  به ترتیب سختی جانبی دیوار بنایی کلافدار و بدون کلاف می باشند.

### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق سختی جانبی دیوار بنایی بازشودار با کلاف و بدون

- of Struct. Engrg., ETH Zurich, Zurich, Switzerland (in German), 1984, 3-8.
- [8] Federal Emergency Management Agency; FEMA 356; "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings"; American Society of Civil Engineers Reston, Virginia, 2000, Chapter. 7, 276-307.
- [9] Publication No. 360, "Instructions for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings"; 2<sup>nd</sup> Revision, Technical Office of the Planning and Management Organization, 2013.
- [5] Behnamfar, F. & Afshari, M. "Collapse Analysis and Strengthening of Stone Arch Bridges Against Earthquake"; International Journal of Architectural Heritage, Conservation, Analysis, and Restoration, 2014, 3-6.
- [6] Sarrafi; B., Eshghi; S., "Experimental Study on Lateral Strength of Confined Masonry Walls"; 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, 2012, 2-7.
- [7] Ganz; H.R.; and Thurlimann; B.; "Testson masonry walls under normal and shear loading."; Rep. No. 7502-4, Inst.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Shafiei Varzaneh, F. Behnamfar, Effect of opening on the lateral stiffness of masonry walls with and without ties, Amirkabir J. Civil Eng., 52(12) (2021) 3031-3042.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.16157.6144](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16157.6144)

