

# مدل سازی و تحلیل غیرخطی المان‌های مصالح بنایی به روش ترک پخشی ثابت

امیر حسن بریمانی<sup>۱</sup>، مسعود سلطانی محمدی<sup>۲\*</sup>، عباسعلی تسنیمی<sup>۳</sup>

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس  
۲- دانشیار گروه مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس  
۳- استاد گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

msoltani@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: آبان ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: فروردین ۱۳۸۷)

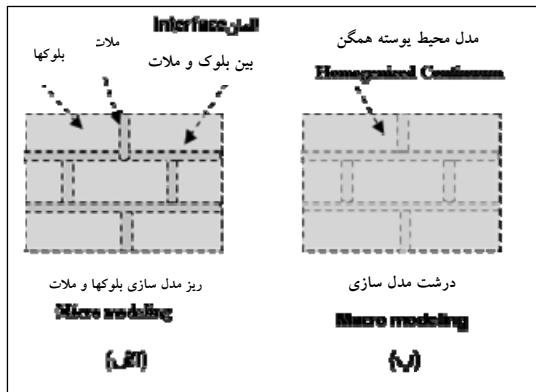
**چکیده-** هدف از این تحقیق توسعه مدل‌های رفتاری غیرخطی و اعتبارسنجی آن برای ارزیابی رفتار اجزاء مصالح بنایی، برپایه مدل پیوسته و روش ترک پخشی ثابت<sup>۱</sup> است. برنامه‌ی اجزا محدود WCOMD که اساساً برای مدل‌سازی و تحلیل المان‌های بتن مسلح تهیه شده به عنوان پایه‌ی مدل‌سازی و تحلیل در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته و مدل‌های رفتاری و معیارهای تسلیم بر مبنای نتایج آزمایش‌های موجود بر روی پانل‌های مصالح بنایی اصلاح شده است، به گونه‌ای که قابلیت مدل‌سازی رفتار غیرهمسان و غیرخطی مصالح بنایی را دارا باشد. رفتار پس از ترک خوردگی مصالح در جهت عمود بر ترک (نرم شدگی کششی<sup>۲</sup>) بر مبنای تئوری پهنای ترک<sup>۳</sup> و برحسب انرژی شکست و اندازه‌ی المان در اجزاء محدود مورد محاسبه قرار می‌گیرد و همچنین تأثیر ترک خوردگی بر رفتار فشاری مصالح بر مبنای تئوری میدان فشاری<sup>۴</sup> منظور می‌شود. اعتبار مدل‌های رفتاری و روش تحلیل با بررسی نتایج آزمایشگاهی موجود در خصوص پانل‌های مصالح بنایی و دیوارهای برشی مصالح بنایی، سنجش و بررسی می‌شود.

**کلید واژگان:** تحلیل غیرخطی، ترک پخشی، مدل رفتاری، مصالح بنایی، اجزای محدود.

1 . Fixed Smeared Crack  
2 . Tension Softening  
3 . Crack Band Theory  
4 . Compression Field Theory

## ۱- مقدمه

ریز مدل سازی، شامل تحلیل های پرجزئیات بر روی نمونه های مصالح بنایی به همراه نمایش کامل واحدها



شکل ۱ مدل سازی رفتار دیوارهای با مصالح بنایی الف) ریز مدل سازی ب) درشت مدل سازی

(آجر، بلوک،...)، ملات و تماس واحد- ملات است. هدف اصلی ریز مدل سازی ارائه ی دقیق خواص مصالح بنایی از روی اطلاعات مربوط به خواص هر یک از مؤلفه ها و تماس میانشان است و می تواند گسترش ترک و خرابی در نمونه های مصالح بنایی را با دقت بسیار بالاتری نسبت به روش دوم ارائه کند. این رویکرد به دلیل حجم بالای تعداد المان ها و زمان بر بودن مدل سازی و محاسبات و از طرفی نیاز به اطلاعات آزمایشگاهی کامل از خصوصیات اجزا سازنده و اندرکنش میان آنها، کمتر مورد توجه محققین و مهندسين بوده و بیش تر در محدوده کارهای دانشگاهی و توسعه ی مدل های رفتاری مصالح بنایی و برای نمونه های کوچک و یا حالت های بسیار غیریکنواخت تنش و کرنش اجزاء مصالح بنایی استفاده می شود. در تحلیل های بزرگ و کاربردی به منظور بررسی رفتار کلی سازه ها، شیوه درشت مدل سازی به کار می رود و از ارائه ی مستقیم اندرکنش میان سطوح واحدهای بنایی و ملات و نیز نمایش مجزای آنها صرف نظر می شود. در

یکی از قدیمی ترین مصالح ساختمانی که هنوز هم به طور گسترده در صنعت ساختمان سازی یافت می شود، مصالح بنایی بوده که مهم ترین عامل رونق آن سادگی اجرا است. به بیان دیگر فرارگرفتن قطعه های سنگ یا آجر روی یکدیگر به همراه چسبندگی ملات، تکنیکی ساده با قدمتی طولانی و در عین حال کاربردی و مؤثر است.

مشخصات مصالح بنایی هم چون داشتن عوامل زیبایی شناسی، استحکام، دوام، هزینه های تعمیر و نگهداری کم، تنوع و نیز مقاومت در برابر آتش سوزی، قابلیت رقابت مصالح بنایی را با سایر مصالح سازه ای ایجاد می کند و از سوی دیگر، عدم پیشرفت یکسان قوانین طراحی سازه های بنایی در مقایسه با سایر سازه ها که ناشی از فقدان بینش لازم بر رفتار پیچیده واحدها (نظیر آجر، بلوک و یا قطعات سنگ)، ملات و اتصالات میان آنها است، مانع از ابداع کاربردهای نوین مصالح بنایی می شود. بررسی رفتار سازه های بنایی به منظور تکامل شناخت آنها موضوع بسیاری از مطالعات به خصوص به صورت آزمایشگاهی بوده، ولی در بررسی عددی این رفتار بطور معمول ساده سازی های زیادی در مطالعات پیشین مشهود است.

به منظور شبیه سازی بهتر رفتار غیر خطی دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح، مدل سازی های دقیق تر در سالیان اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته که می توان به دو گروه الف) ریز مدل سازی شامل مدل سازی بلوک ها و ملات اتصال دهنده آنها به صورت جداگانه به همراه مدل سازی جدایش و لغزش بلوک ها در محل اتصال با ملات (شکل ۱- الف) و ب) مدل محیط پیوسته مصالح بنایی که از مدل های رفتاری متوسط مصالح بنایی، با همگن سازی اجزا تشکیل دهنده ی آن استفاده می کند (شکل ۱- ب)، اشاره کرد [۱].

سازگاری و استفاده از مدل‌های رفتاری متوسط مدل می‌شوند [۵].

در راستای توسعه‌ی مدل‌های رفتاری و تئوری‌های وابسته به روش ترک پخشی کارهای انجام شده را می‌توان در دو مقوله‌ی ریزمدل سازی و مدل‌سازی به صورت محیط پیوسته تقسیم‌بندی کرد. در خصوص مدل‌های محیط پیوسته که بیش‌تر در زمینه اعضا بتن مسلح توسعه یافته‌اند، می‌توان به کارهای تحقیقاتی و آزمایشات انجام شده در دانشگاه تورنتو کانادا توسط وکیو و کولینز [۶]، تحقیقات صورت گرفته در دانشگاه توکیو ژاپن زیر نظر مائاکاوا و اوکامورا [۳-۴] و همچنین کارهای صورت گرفته توسط سو و همکاران [۷] در دانشگاه هوستون اشاره کرد.

در خصوص ریز مدل‌سازی رفتار المان‌های بتن مسلح که اصولاً در شبیه‌سازی گسترش ترک و توسعه مدل‌های رفتاری برای استفاده در روش ترک پخشی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد می‌توان به کار بلتی [۸] و سلطانی و همکاران در دانشگاه توکیو [۹-۱۰] اشاره کرد که قابل گسترش برای المان‌های مصالح بنایی نیز هست. برنامه‌ی اجزاء محدود WCOMD که در این مقاله مورد اصلاح و استفاده قرار گرفته است، اساساً برای تحلیل غیرخطی اعضا بتن مسلح در تعامل با خاک تهیه شده است. در این برنامه، رفتار بتن قبل از ترک خوردگی بر مبنای تئوری الاستوپلاستیک و شکست<sup>۲</sup> محاسبه می‌شود و مدل‌های رفتاری پس از ترک خوردگی شامل مدل سخت شدگی بتن، مدل فشاری اصلاح شده (که اثر ترک خوردگی را بر آن منظور می‌کند) و مدل رفتاری انتقال برش و دایلاتنسی در سطح ترک می‌باشند. برای دسترسی به جزئیات بیشتر مدل‌سازی و مدل‌های رفتاری مربوطه رجوع به مراجع [۳-۴] توصیه می‌شود.

این شیوه مصالح بنایی به‌صورت پیوسته، همگن و غیرهمسان مدل شده و رفتار و گسترش خرابی آن به‌طور متوسط در مدل‌های رفتاری تنش- کرنش مربوطه دیده می‌شود [۲].

در این شیوه نیازی به مشخصه‌های اجزاء تشکیل‌دهنده نیست، بلکه پارامترهای موثر، از آزمایش بر روی پانل‌های بنایی تحت حالت‌های تنش یکنواخت به دست می‌آیند [۱].

در این مقاله، تکنیک قوی استفاده شده در برنامه اجزای محدود WCOMD، که بر روش ترک پخشی چند جهت برای مدل‌سازی المان‌های بتن مسلح به صورت محیط پیوسته مبتنی است و در دانشگاه توکیو توسعه داده شده [۳-۴]، استفاده شده و با اصلاح مدل‌های رفتاری و منحنی‌های خرابی، المان مصالح بنایی به آن افزوده شده است. در ادامه ضمن بررسی مدل‌های رفتاری المان مصالح بنایی، روش تحلیل به عنوان یک روش دقیق و کارا در بررسی دیوارهای برشی مصالح بنایی ارائه شده است. تعدادی از آزمایش‌های انجام شده بر روی المان‌های مصالح بنایی و دیوارهای آجری برشی مورد تحلیل غیرخطی قرار گرفته و نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

## ۲- روش ترک پخشی و مدل‌های رفتاری مبتنی بر محیط پیوسته<sup>۱</sup>

در روش ترک پخشی در اجزاء محدود که بر مبنای مدل‌های رفتاری متوسط مواد، پیش و پس از ترک خوردگی است، مکانیزم‌های اصلی و مؤثر در رفتار غیرخطی اعضا ترک‌خورده با ایده‌آل سازی قسمت ترک‌خورده به صورت ترک گسترده و با توجه به معادلات تعادل و شرایط

2. Elasto-Plastic Fracture

1. Continuum Based Constitutive Laws

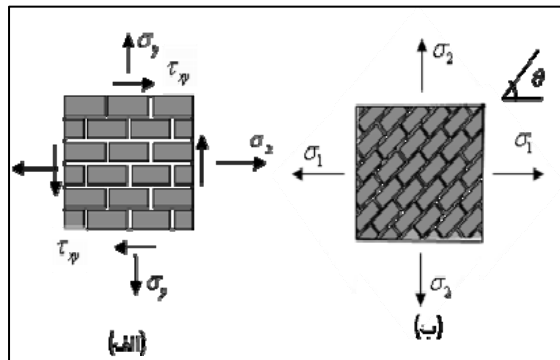
### ۳- مدل سازی مصالح بنایی

رفتار المان های مصالح بنایی به عنوان یک ماده مرکب به علت پیچیدگی رفتار و اندرکنش اجزاء تشکیل دهنده آنها یعنی بلوک ها، ملات اتصال دهنده بلوک ها و بازشدگی و لغزش بین بلوک ها و ملات بسیار پیچیده بوده و نیاز به یک بررسی جامع از رفتار مجزای این اجزاء را می طلبد. با این حال با شناخت رفتار متوسط المان های مصالح بنایی و استفاده از ارتباط متوسط تنش و متوسط کرنش در مدل همگن این المان ها، می توان با یک دقت و زمان تحلیل مناسب، رفتار غیرخطی مصالح بنایی را به صورت ماده همگن و پیوسته بررسی کرد (شکل ۱-ب).

روش به کار رفته در این تحقیق همان فرمول سازی الاستو-پلاستیک و شکست المان های بتنی به صورت همسان بوده [۹] که به منظور اعمال عدم همسانی در مصالح بنایی از سطوح خرابی ارائه شده در مرجع [۲] استفاده شده است و بر مبنای راستای تنش اصلی در نقاط انتگرال گیری و استفاده از تئوری میدان فشاری، گام به گام سختی و مقاومت المان اصلاح می شود.

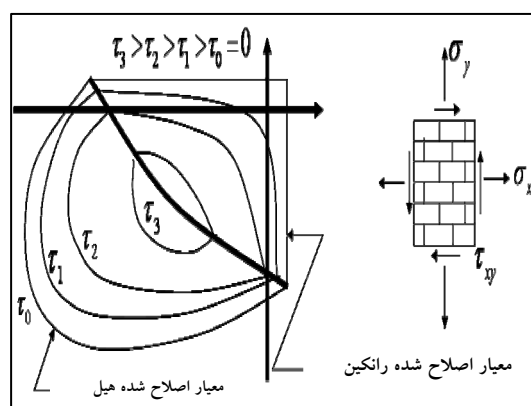
#### ۳-۱- معیار شکست برای مدل پیوسته ی غیر همسان

برای تحلیل صحیح سازه های بنایی با استفاده از درشت مدل سازی، نیاز به شرح رفتار مصالح در تمامی حالت های تنش دو بعدی است، به بیانی دیگر، ارائه ی یک سطح تسلیم ارتوتروپ تنها بر حسب تنش های اصلی، ممکن نیست و برای وضعیت تنش صفحه ای که مورد نظر است، سطح تسلیم باید بر حسب بردار تنش کامل  $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$  ارائه شود (شکل ۲). بسیاری از معیارهای خرابی تعریف شده و موجود، آنقدر پیچیده و نیازمند اطلاعات آزمایشگاهی زیاد هستند که استفاده از آنها در الگوریتم های عددی پیشرفته بسیار مشکل و گاهی غیرممکن است.



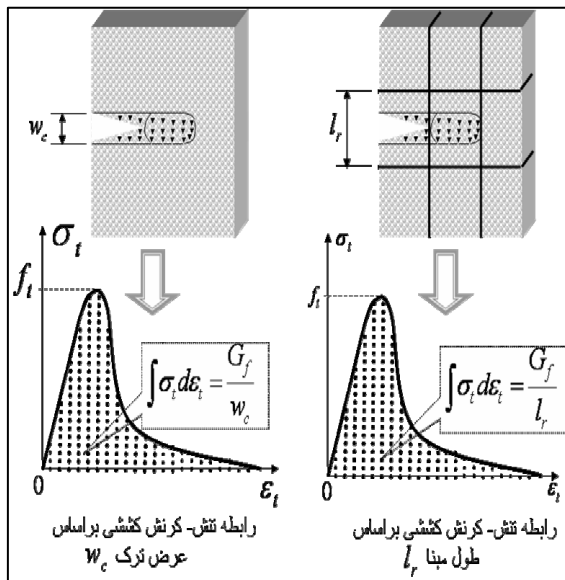
شکل ۲ الف) تنش های اعمالی بر المان در امتداد محورهای مصالح، ب) تنش های بیشینه و راستای آنها

برای تشریح این معیار، محورهای مصالح در راستای بندهای افقی و قائم ملات به ترتیب راستاهای  $X$  و  $Y$  تعریف می شوند و مدل های رفتاری و سطوح خرابی بر حسب تنش در این راستاها شامل  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  و  $\tau_{xy}$  هستند. نمایش دیگر تنش ها می تواند بر حسب تنشهای اصلی و زاویه  $\theta$  باشد. زاویه  $\theta$  چرخش میان محورهای تنش اصلی و محورهای مصالح را اندازه گیری می کند. به طور آشکار برای یک ماده با رفتار ارتوتروپ، دیاگرام های تنش اصلی متفاوتی متناظر با مقادیر  $\theta$ ، برای مقادیر مختلف  $\tau_{xy}$  حاصل می شود (شکل ۳).



شکل ۳ منحنی های شکست برای یک نمونه ی بنایی [۲]

مجزا برای هر جهت و نیز انرژی‌های شکست متفاوت تعریف می‌شود. به عبارتی تنش در سطح ترک، پس از ترک خوردگی بلافاصله صفر نشده بلکه با یک رفتار نرم شونده که در روش اجزا محدود وابسته به اندازه‌ی المان و انرژی شکست مصالح می‌باشد، تعیین می‌شود (شکل ۴ و رابطه ۲).



شکل ۴ رفتار نرم شدگی کششی

$$\sigma = f_t \left( \frac{\varepsilon_{III}}{\varepsilon} \right)^c \quad (2)$$

$\varepsilon$  و  $\varepsilon_{III}$  به ترتیب کرنش متوسط و کرنش ترک‌خوردگی هستند. مقدار ضریب نرم شدگی،  $c$ ، پس از ترک‌خوردگی بر مبنای انرژی شکست المان مصالح بنایی در دو راستای متعامد و اندازه‌ی المان در این دو راستا، بر مبنای تئوری پهنای ترک توسعه داده شده توسط بازان و او [۱۱] قابل تعیین است. برای المان‌های غیر مسلح، باید مقادیر ضریب نرم شدگی متفاوتی برای منعکس کردن انرژی آزاد شده استفاده شود که مقدار آن با معادل سازی انرژی شکست

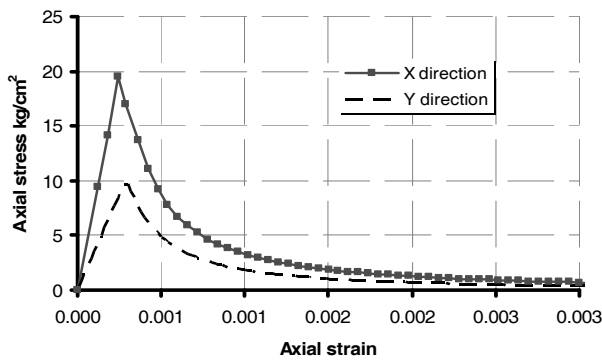
در این تحقیق برای فرمول‌بندی منحنی خرابی از معیار اصلاح شدی هیل برای ناحیه ی فشاری و معیار اصلاح شده رانکین برای ناحیه کششی که توسط لورنسو و روتز [۲] برای مصالح بنایی توسعه داده شده است، استفاده می‌شود. فرمول‌بندی هیل برای ناحیه فشاری سه بعدی است ولی از آنجایی که تأثیر راستای خارج از صفحه ناشناخته بوده و برای این تحقیق ضرورت نداشته است، رابطه به صورت دو بعدی لحاظ شد. معیار تسلیم رانکین، مقاومت مصالح را در امتداد تنش اصلی بیشینه ارائه می‌دهد ولی می‌دانیم که این امر برای مصالح غیر ایزوتروپ مقدور نیست، بنابراین معیار رانکین را بر حسب تنش‌های امتداد محورهای مصالح با اعمال اثر تنش برشی بیان کرده‌ایم. به واسطه این تغییرات کلمه اصلاح شده به نام این معیارهای خرابی افزوده شده است.

### ۳-۱-۱- معیار اصلاح شدهی رانکین

معیار اصلاح شدهی رانکین برای مصالح ارتوتروپیک با مقاومت‌های کششی متفاوت  $f_{tx}$  و  $f_{ty}$  در راستاهای  $X$  و  $Y$  به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$f_1 = \frac{(\sigma_x - f_{tx}) + (\sigma_y - f_{ty})}{2} + \sqrt{\left( \frac{(\sigma_x - f_{tx}) - (\sigma_y - f_{ty})}{2} \right)^2 + \alpha \cdot \tau_{xy}^2} = 0 \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق پارامتر  $\alpha$  تأثیر تنش برشی را در شکست کششی کنترل می‌کند، به عبارتی به مشارکت تنش برشی در شکست کششی وزن می‌دهد و اگر مقدار  $\alpha$  برابر یک قرار داده شود، همان معیار رانکین اصلی به دست می‌آید. در این تحقیق رفتار غیرخطی شامل نرم‌شدگی پس از نقطه‌ی بیشینه به صورت تابع نمایی



شکل ۵ رفتار کششی متفاوت نمونه‌ی مصالح بنایی ارتوتروپیک در دو امتداد متعامد

برای راستاهای ترک خوردگی غیر از دو راستای متعامد  $X$ - $Y$ ، ضریب نرم‌شدگی بسته به زاویه ترک خوردگی و انرژی شکست دو راستای متعامد به روش ارائه شده توسط مایکاووا و هاوکه [۴] تعیین می‌شود (رابطه‌ی ۴).

$$G_{f\theta} = G_{fx} \cdot \cos^2 \theta + G_{fy} \cdot \sin^2 \theta \quad (4)$$

$\theta$ ، زاویه‌ی بردار عمود بر صفحه‌ی ترک با محور  $X$  و  $G_{fx}$  و  $G_{fy}$  سطح زیر منحنی تنش- کرنش در راستاهای  $X$  و  $Y$  است.

با توجه به محدودیت نتایج آزمایشگاهی در خصوص رفتار رفت و برگشت مصالح بنایی، در این تحقیق، منحنی‌های داخلی المان مصالح بنایی برای سادگی مطابق با منحنی‌های داخلی توسعه یافته برای بتن [۳] مدل‌سازی می‌شود (شکل ۶). این فرض توسط محققین دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲].

در عرض ترک و المان برحسب انرژی شکست ( $G_f$ ) و طول مینا ( $l_r$ ) (اندازه المان) تعیین می‌شود (رابطه ۳). از آنجایی که پارامتر  $C$  وابسته به اندازه‌ی المان است، رابطه‌ی تنش کششی متوسط- کرنش متوسط نتیجه شده از آن براساس اندازه‌ی المان تغییر می‌کند.

$$\int \sigma_t d\varepsilon_t = \int f_t \times \left( \frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon_t} \right)^c d\varepsilon_t = \frac{G_f}{l_r} \quad (3)$$

نتایج تحلیل یک المان مصالح بنایی تحت کشش خالص توسط برنامه‌ی اصلاح شده WCOMD در دو راستای متعامد، در شکل ۵ و مشخصات المان مصالح بنایی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات المان مصالح بنایی تحلیل شده تحت کشش تک‌محوره در هر راستا

مقاومت کششی امتداد $y$ ( $kg/cm^2$ )	مقاومت کششی امتداد $x$ ( $kg/cm^2$ )	مقاومت فشاری امتداد $y$ ( $kg/cm^2$ )	مقاومت فشاری امتداد $x$ ( $kg/cm^2$ )
$f_{ty} = 10.0$	$f_{tx} = 20.0$	$f_{my} = 40.3$	$f_{mx} = 84.4$
ضرایب ارتوتروپیک مصالح			
$\alpha = 1.0$	$\beta = -1.17$	$\gamma = 9.6$	

## ۳-۱-۲- معیار اصلاح شده ی هیل

ساده ترین سطح شکست که مشخصه ی آن مقاومت های فشاری متفاوت در امتداد محورهای مصالح بوده، به صورت بیضی تمرکز یافته و چرخنده در فضای تنش صفحه ای کامل،  $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$  است. رابطه ی ۵ بیان معیار هیل با چهار پارامتر مصالح  $A, B, C, D$  است و اگر  $B^2 - 4AC < 0$  برقرار باشد، بر تحدب و برآمدگی منحنی دلالت دارد (روابط ۶-۹).

$$f_2 = A\sigma_x^2 + B\sigma_x\sigma_y + C\sigma_y^2 + D\tau_{xy}^2 - 1 = 0 \quad (5)$$

$$A = \frac{1}{(f_{mx})^2} \quad (6)$$

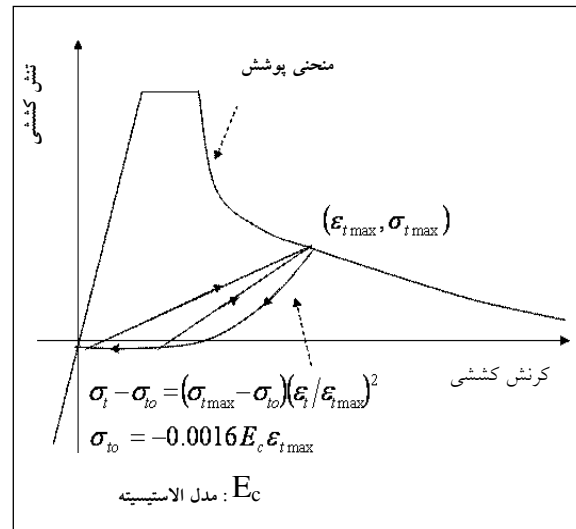
$$B = \frac{\beta}{(f_{mx} \cdot f_{my})} \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{(f_{my})^2} \quad (8)$$

$$D = \frac{\gamma}{(f_{mx} \cdot f_{my})} \quad (9)$$

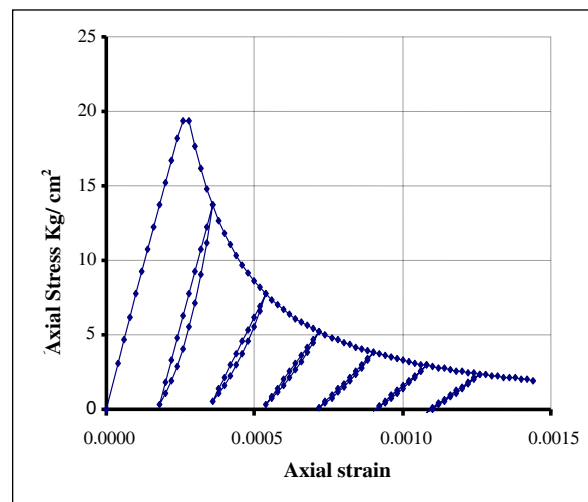
$f_{mx}$  و  $f_{my}$  مقاومت های فشاری تک محوره در امتداد محورهای مصالح هستند. پارامتر  $\beta$  اثر جفت شدگی تنش های متعامد، یعنی چرخش های سطح تسلیم حول محور تنش برشی، را نشان می دهد. پارامتر  $\gamma$  تاثیر تنش برشی در شکست فشاری را کنترل می کند.

رفتار غیر خطی فشاری شامل سخت شدگی سهموی و پس از آن نرم شدگی سهموی - نمایی در هر دو راستا و با انرژی های شکست متفاوت،  $(G_{fcx}, G_{fcy})$ ، برای هر میزان گسیختگی است. کرنش متناظر با مقاومت فشاری پیک  $\epsilon_p$  خود یک پارامتر مصالح فرض شده است. به



شکل ۶ منحنی های داخلی المان تحت کشش [۳]

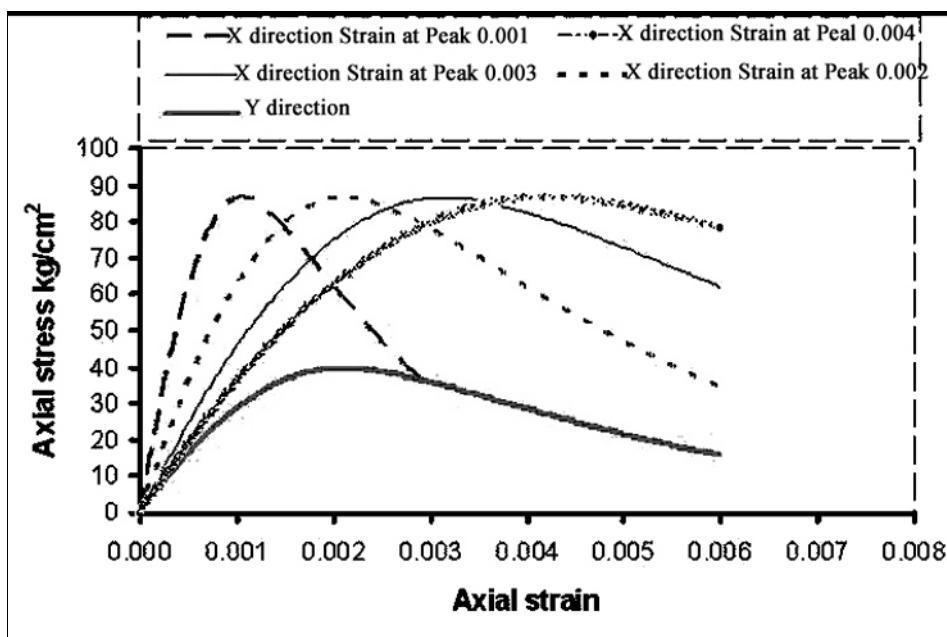
در شکل ۷ یک نمونه منحنی رفت و برگشتی برای المان تعریف شده در جدول ۱، در راستای X نشان داده شده است.



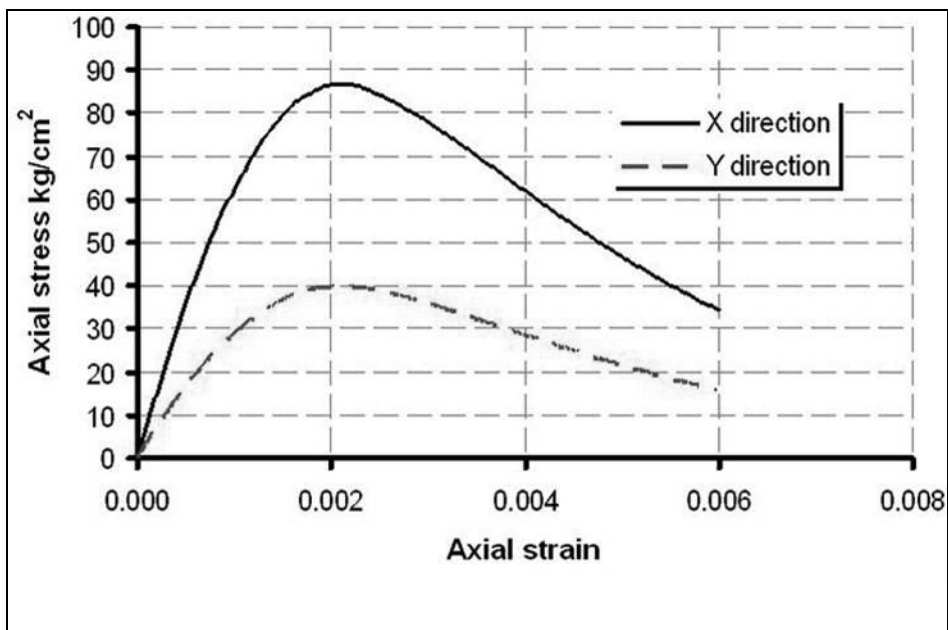
شکل ۷ منحنی های رفت و برگشتی کششی در امتداد X برای نمونه ی المان مصالح بنایی







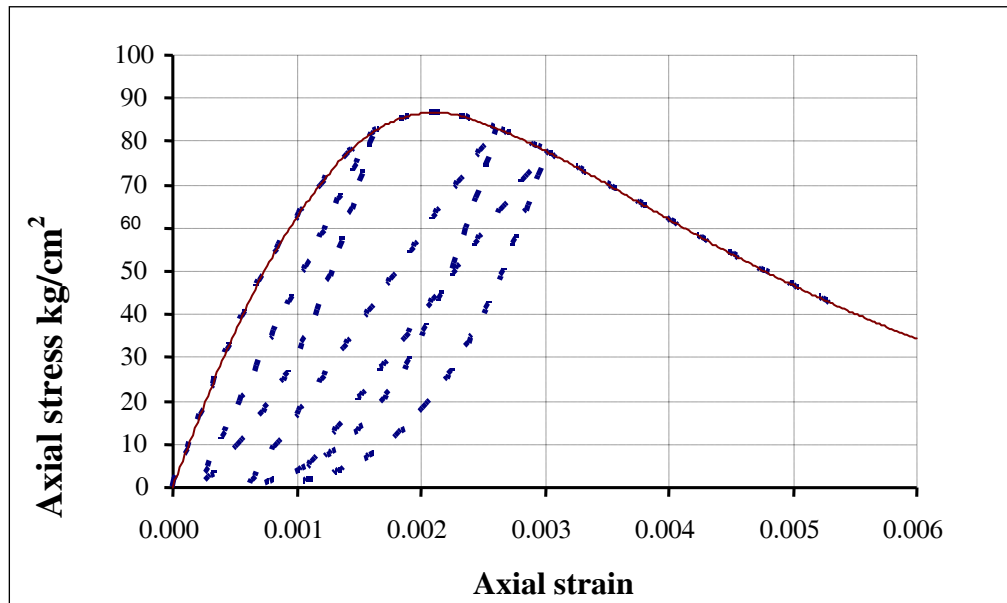
شکل ۹ رفتار فشاری متفاوت نمونه‌ی مصالح بنایی ارتوتروپیک در دو امتداد متعامد



شکل ۱۰ تاثیر کرنش متناظر با تنش حداکثر بر مدل‌های رفتاری فشاری نمونه‌ی المان مصالح بنایی

منحنی های داخلی رفتار فشاری مصالح بنایی مطابق با کار صورت گرفته توسط مایکاو و اوکامورا [۳] منظور شده است. در شکل ۱۱، برای نمونه رفتار رفت و برگشتی المان مصالح بنایی تعریف شده در جدول ۱ ارائه شده است.

مسیرهای بارگذاری بسیاری را می توان برای محاسبه ی این پارامترها انتخاب کرد. همچنین مرجع [۱۳] به بررسی و تعیین پارامترهای فوق با ریز مدل سازی المان پایه مصالح بنایی می پردازد.



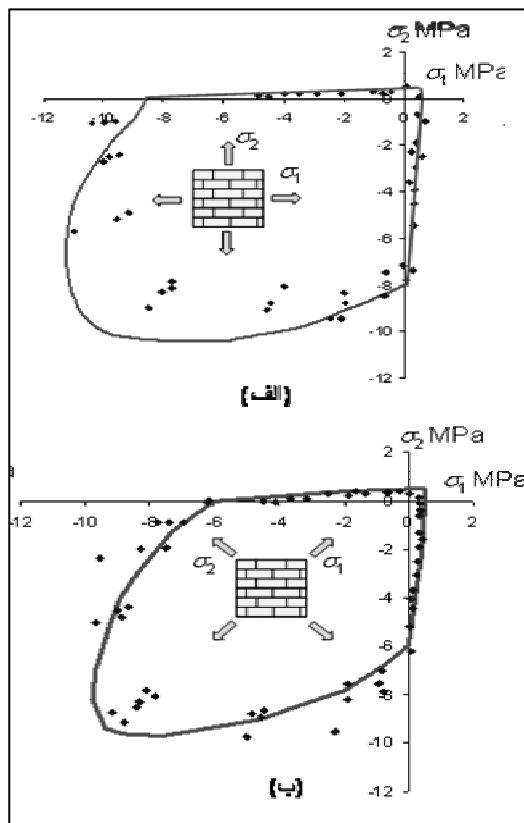
شکل ۱۱ منحنی های رفت و برگشتی فشاری در امتداد X برای نمونه ی المان مصالح بنایی

### ۳-۲- برآورد پارامترها و اطلاعات لازم برای تعریف معیار شکست

در روابط معیارهای پیشنهادی فوق، ۷ پارامتر مقاومت  $(f_{tx}, f_{ty}, f_{mx}, f_{my}, \alpha, \beta, \gamma)$  و ۵ پارامتر رفتار غیرارتجاعی  $(G_{fx}, G_{fy}, G_{fxc}, G_{fyc}, k_p)$  وجود دارد که برای تعیین این پارامترها به مجموعه ای از نتایج آزمایشگاهی به صورت کنترل جابجایی بر روی واحدهای بنایی و یا تحلیل پارامتریک بر روی مدل های دقیق مصالح بنایی (ریزمدل ها شکل ۱-الف) نیاز است. مرجع [۲] مجموعه ای از آزمایشات مناسب برای تعیین پارامترهای فوق ارائه کرده است ولی بطور کلی می توان گفت که

### ۴- بررسی صحت مدل با مقایسه ی نتایج آزمایش های ۲ محوره بر پانل های بنایی

معیارهای شکست تشریح شده در بخش قبل به نرم افزار WCOMD افزوده شد تا قادر به بررسی رفتار مصالح بنایی باشد. در ادامه به بررسی نتایج تحلیل المان های بنایی با استفاده از این برنامه و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پرداخته می شود. از میان پانل های آزمایشگاهی مورد بررسی می توان به نمونه های آزمایش شده توسط پیچ [۱۴-۱۵] و پانل های بارگذاری شده در ETH زوریخ توسط گانز و تیولیمان [۱۶] اشاره کرد. کامل ترین اطلاعات آزمایشگاهی در مورد مقاومت دو



شکل ۱۲ مقایسه‌ی منحنی خرابی در تحلیل و آزمایش الف) زاویه‌ی اعمال تنش برابر با ۰°، ب) زاویه‌ی اعمال تنش ۴۵ درجه

## ۵- بررسی صحت مدل با مقایسه‌ی نتایج آزمایش دیوارهای آجری

به منظور بررسی دقت روش و مدل‌های رفتاری استفاده شده در تحلیل اجزاء مصالح بنایی، دیوارهای آجری آزمایش شده به- وسیله گانز و تیولیمان [۱۶] تحت بارهای اعمالی قائم و جانبی تحلیل شده است. آن‌ها چهار دیوار را تحت شرایط بارگذاری متفاوت آزمایش کردند. در این تحقیق به غیر از دیوار W3 سه دیوار دیگر مدل‌سازی شده‌اند. دیوار W3 دارای آرما توره‌ای افقی و خارج از بحث این تحقیق می‌باشد، بنابراین از این مورد

محوره‌ی نمونه‌های بنایی توسط پیچ ارائه شده است. او ۱۰۲ پانل بنایی آجر رسی توپر با مقیاس  $1/2$  و ابعاد  $360 \times 360 \times 50 \text{ mm}^3$  را آزمایش کرد. پانل‌ها به تناسب در راستای تنش‌های اصلی  $\sigma_1$  و با سوگیری‌های متفاوت  $\theta$  نسبت به محورهای مصالح بارگذاری شدند. در شکل ۱۲ نتایج آزمایش پیچ با نقاط مجزا و منحنی شکست به دست آمده توسط برنامه WCOMD با خط پیوسته ارائه شده است و همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نزدیکی مناسبی میان نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی وجود دارد. به عبارتی اگر پارامترهای مؤثر در معیار خرابی با دقت مناسب تعیین شوند، برنامه اصلاح شده قادر به تعریف سطوح خرابی با دقت بالا می‌باشد. پارامترهای مقاومتی بر مبنای آزمایشات پیچ، مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ پارامترهای مقاومتی بر مبنای نتایج آزمایشات مراجع

[۱۴-۱۵]

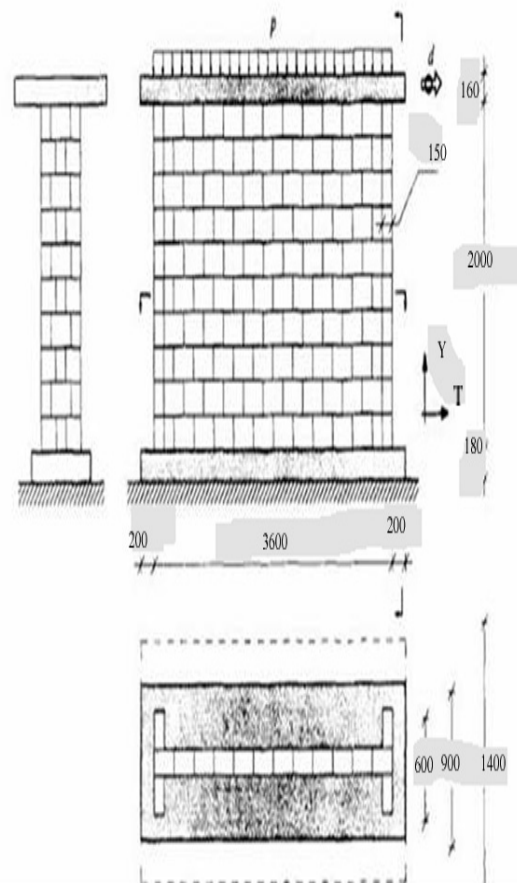
$f_{tx}$	0.43MPa
$f_{ty}$	0.32MPa
$f_{mx}$	8.74MPa
$f_{my}$	8.03MPa
$\alpha$	1.26
$\beta$	1.17
$\gamma$	9.59

جدول ۳ مشخصات مصالح بنایی در دیوارهای W

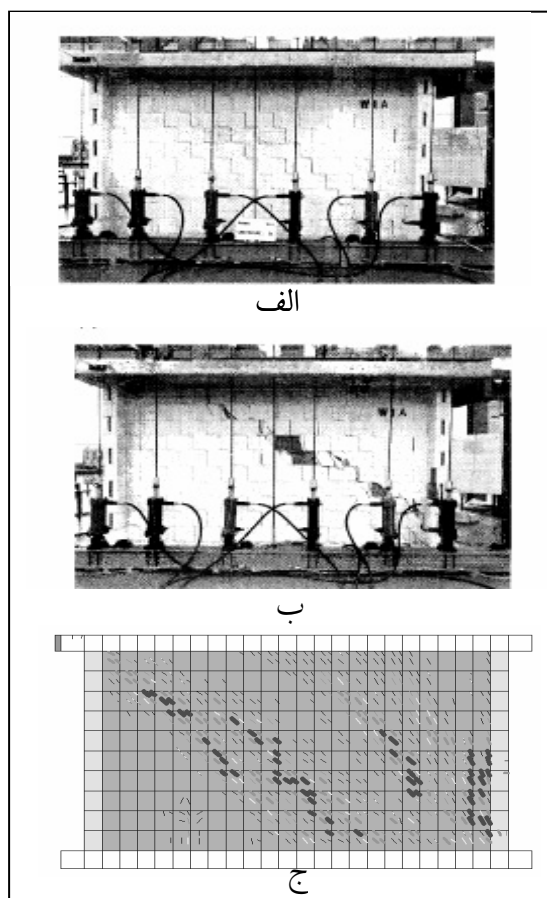
خصوصیات ارتجاعی	
$E_x (MPa)$	2460
$E_y (MPa)$	5460
$\nu_{xy}$	0.18
$G_{xy} (MPa)$	1130
خصوصیات غیرارتجاعی (ناحیه فشار)	
$f_{mx} (MPa)$	1.87
$f_{my} (MPa)$	7.61
$\beta$	-1.05
$\gamma$	1.20
$G_{fcx} (MPa)$	5.0
$G_{fcy} (MPa)$	10.0
$\epsilon_p$	$8 \times 10^{-4}$
خصوصیات غیرارتجاعی (ناحیه کشش)	
$f_{tx} (MPa)$	0.28
$f_{ty} (MPa)$	0.05
$\alpha$	1.73
$G_{fx} (MPa)$	0.02
$G_{fy} (MPa)$	0.02

اولین دیوار تحلیل شده، w1 نام دارد. این دیوار در معرض بار قائم گسترده با شدت  $0.61 MPa$  قرار گرفت که برآیند آن  $415 KN$  می شود. این دیوار در برابر اعمال جابجایی افقی در تراز دال بتنی بالای دیوار، پاسخ بسیار شکل پذیری به همراه شکست کششی و برشی در امتداد ترک های پله ای قطری نشان داده است. در شکل ۱۴ منحنی های نیرو-جابجایی آزمایشگاهی و محاسباتی ارائه شده است و همانطور که مشاهده می شود تطبیق مناسبی به ویژه در مقاومت نهایی حاصل شده است. هم چنین الگوی ترک خوردگی دیوار w1 در دو مدل آزمایشگاهی و

صرف نظر شده است. ابعاد و مشخصات مصالح این دیوارها یکسان هستند و فقط بارگذاری های آنها تغییر می کند. نتایج تحلیل و نیز آزمایش دیوارها به صورت منحنی های نیرو-جابجایی و الگوهای ترک خوردگی در ذیل ارائه و بررسی می شود. هندسه دیوار آزمایش شده و نحوه اعمال بار در شکل ۱۳ و مشخصات مصالح در دو راستای متعامد در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به اختلاف زیاد مقادیر مقاومت های کششی و فشاری در دو امتداد X و Y، معرف رفتار، خاصیت غیر همسانی دیوارها بسیار زیاد است.



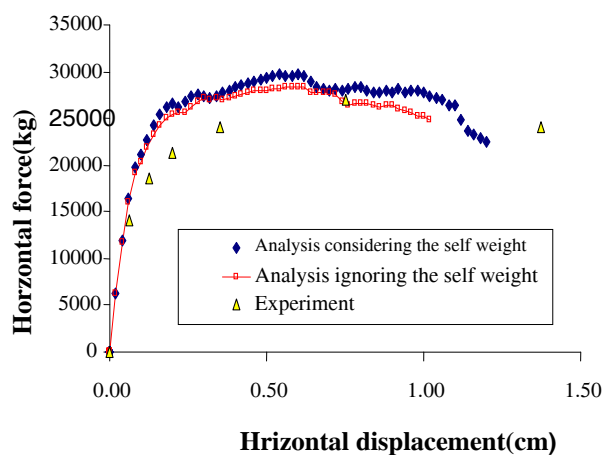
شکل ۱۳ مشخصات مصالح و ابعاد هندسی دیوارهای w [۱۶]



شکل ۱۵ الف) الگوی ترک خوردگی دیوار W1 آزمایش در بیشینه نیروی جانبی [۱۶]، ب) الگوی ترک خوردگی نهایی آزمایش [۱۶]، ج) الگوی ترک خوردگی مدل عددی

دیوار W7 همه‌ی مشخصات دیوار W2 را دارد، با این تفاوت که برای بارهای جانبی رفت و برگشتی آزمایش شده است. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب منحنی‌های نیرو جابجایی و الگوهای ترک خوردگی برای مدل عددی و آزمایش ارائه شده‌اند و همان‌طور که دیده می‌شود تطبیق مناسبی ایجاد شده است. سختی جانبی اولیه‌ی مدل با سختی اولیه‌ی دیوار آجری W7 و مقاومت نهایی آن با دیوار W2 کاملاً منطبق است و هم‌چنین الگوی ترک خوردگی حاصل مدل عددی با الگوی ترک خوردگی واقعی آزمایش تطبیق مناسبی دارد.

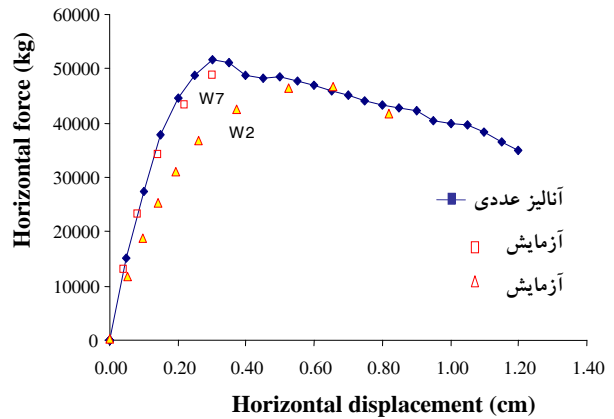
محاسباتی در شکل ۱۵ نمایش داده شده است که ترک‌های قطری در هر دو الگو مشهود بوده و موقعیت مکانی ترک‌ها بر یک‌دیگر منطبق است.



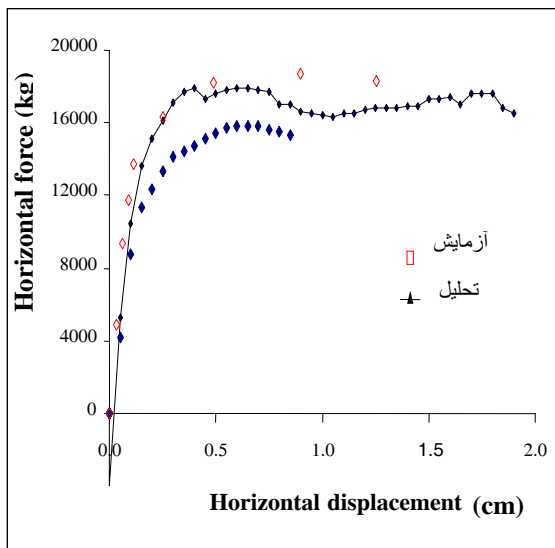
شکل ۱۴ منحنی نیرو - جابجایی دیوار W1

دیوار تحلیل شده‌ی دیگر که با نام W2 مشخص شد، در معرض بار قائم با شدت  $1.91MPa$  قرار گرفته است. برآیند نیروی قائم برابر  $1287KN$  است. دیوار W2 در ابتدای بارگذاری جانبی رفتار نرمی از خود نشان می‌دهد ولی در دنباله با شکست ترد ناگهانی به سبب خردشدگی ناحیه‌ی فشاری مواجه می‌شود. لازم به ذکر است که دیوار W2 به سبب یک تکیه‌گاه غیریکنواخت در زیر دال تحتانی، رفتاری کم‌تر از حد توقع ارائه می‌دهد، چون این تکیه‌گاه موجب ترک خوردگی اولیه به همراه کاهش سختی اولیه شده است و شاید کاهش ظرفیت دیوار را در پی داشته باشد. با توجه به مشکل ایجاد شده در دیوار W2، گانز و تیولیمن قسمت اولیه‌ی منحنی نیرو جابجایی دیوار W7 را در کنار منحنی دیوار W2 ارائه کردند.

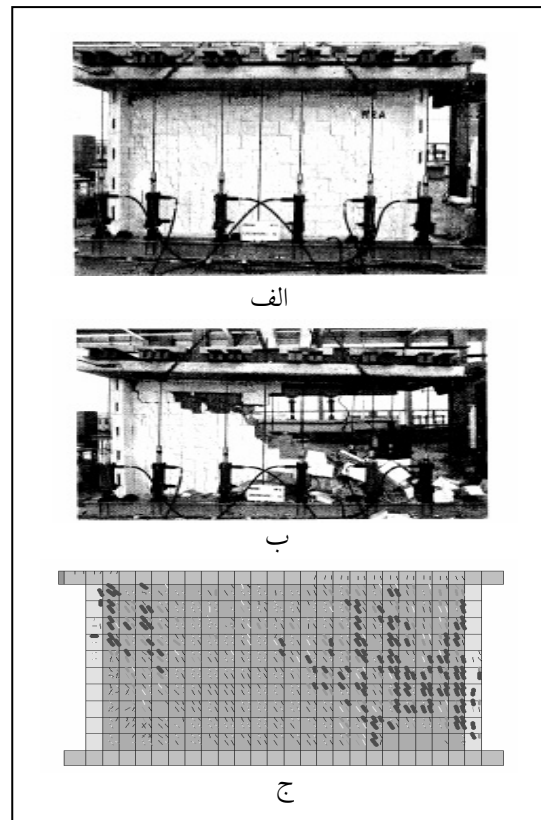
دیوار w4، دیوار تحلیل شده‌ی بعدی است که در معرض یک بار قائم متمرکز برابر  $422\text{KN}$  به همراه خروج از مرکزیت  $840\text{mm}$  نسبت به تار قائم میانه‌ی دیوار قرار گرفته است. این بار قائم از طریق یک پروفیل فولادی در طول  $500\text{mm}$  اعمال شده است. دیوار w4 رفتار نسبتاً شکل پذیری از خود نشان می‌دهد با آن‌که در مراحل نهایی اعمال جابجایی افقی، خردشدگی در پایین لبه‌ی راست دیوار پدیدار می‌شود. در شکل های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب منحنی‌های نیرو-جابجایی و الگوهای ترک خوردگی برای مدل تحلیلی و آزمایش ارائه شده‌اند.



شکل ۱۶ منحنی نیرو-جابجایی دیوار w2 و w7 و آنالیز عددی



شکل ۱۸ منحنی بار-جابجایی دیوار w4



شکل ۱۷ الف) الگوی ترک خوردگی دیوار w2 آزمایش در بیشینه‌ی نیروی جانبی [۱۶]، ب) الگوی ترک خوردگی نهایی آزمایش [۱۶]، ج) الگوی ترک خوردگی مدل عددی

## ۶- نتیجه گیری

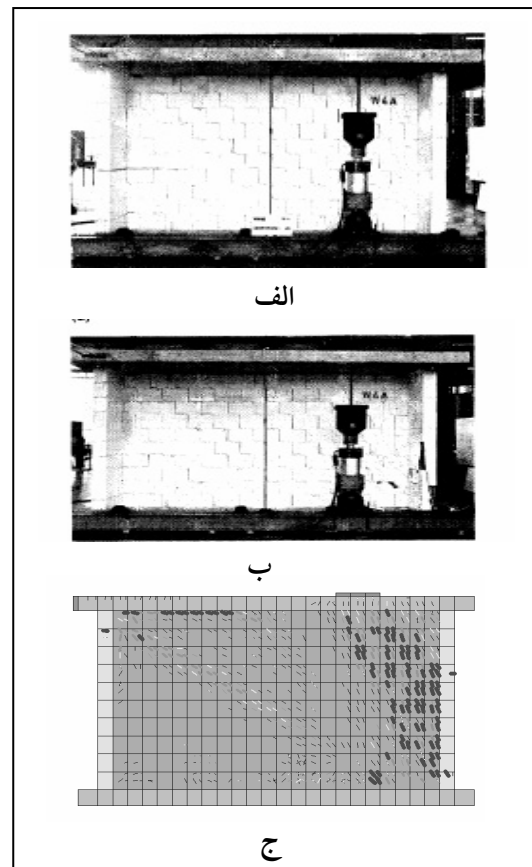
در این تحقیق از برنامه WCOMD که براساس فرمول‌سازی الاستو-پلاستیک و شکست المان‌های بتن مسلح و به‌صورت همسان بوده، استفاده شده است. به منظور اعمال عدم همسانی در مصالح بنایی، مدل‌های متوسط مصالح بنایی با در نظر گرفتن منحنی‌های خرابی ارتوتروپیک آن‌ها توسعه داده شده و در برنامه اجزاء محدود غیرخطی WCOMD اضافه شد.

با مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های دو محوره بر نمونه‌های مصالح بنایی و منحنی‌های شکست به‌دست آمده توسط برنامه‌ی اصلاح شده، دقت مدل‌سازی سطوح تسلیم مصالح بنایی نشان داده شد.

با تحلیل دیوارهای آجری غیرمسلح آزمایش شده و با توجه به مقایسه‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم‌های مختلف شکست و الگوی ترک‌خوردگی آزمایش‌ها به‌خوبی توسط مدل ساخته شده در برنامه WCOMD نمایش داده شده‌اند که این مهم‌ترین تایید برای هر مدل عددی می‌باشد. با مقایسه کلی میان دیگرام‌های نیرو-جابجایی مدل تحلیلی و آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت مدل مذکور از دقت بسیار مناسبی برخوردار است. البته باید در نظر داشت که دقت مدل پیشنهادی به برآورد صحیح پارامترهای مقاومتی و پارامترهای غیرارتجاعی ارائه شده در قسمت قبل وابسته است و بخشی از خطاهای محاسباتی از خطا در تخمین پارامترها منتج می‌شود.

## ۷- منابع

[۱] بریمانی، امیر حسن، بررسی رفتار دینامیکی غیرخطی قاب‌های بتن مسلح با پرکننده‌های مصالح بنایی به



شکل ۱۹ الف) الگوی ترک‌خوردگی دیوار W4 آزمایش در بیشینه نیروی جانبی [۱۶]، ب) الگوی ترک‌خوردگی نهایی آزمایش [۱۶]، ج) الگوی ترک‌خوردگی مدل عددی

همان‌طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است منحنی‌های نیرو-جابجایی حاصل از آنالیز و آزمایش، تطبیق بسیار مناسبی دارند و در شکل ۱۹ الگوی ترک‌خوردگی حاصل از آنالیز به گوشه سمت راست و پایین دیوار امتداد یافته و با ترک‌های حاصل از آزمایش تطبیق دارد.

- [10] Soltani M, An X, M. K., Computational model for post cracking analysis of RC membrane elements based on local stress-strain characteristics, 2003, Engineering Structures, Vol 25, No. 8, P.P. :993-1007.
- [11] Bazant Z.P, Oh B.H." Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Material and Structures, RILEM, Paris, Vol.16, 1983, pp.155-157
- [12] Zhuge Y., Thambiratnam D., Fellow, ASCE, Corderoy J., "Nonlinear Dynamic Analysis of Unreinforced Masonry", Journal of Structural Engineering, March 1998, pp 270-277
- [۱۳] صالحی دلارستانی، ایمان، تعیین مدل های تنش- کرنش متوسط و شکست المان های مصالح بنایی با ریز مدل سازی رفتار و اندر کنش اجزا آن. پایان نامه کارشناسی ارشد، سازه، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [14] Page, A. W., "The strength of brick masonry under biaxial compressive-tension." Int. J. Masonry Constr.1983, 3(1): 26-31.
- [15] Page, A. W, "The biaxial compressive strength of brick masonry." Proc. Instn. of Civ. Engrs., Part 2, Instn.of Civ Engrs., London, England,1981, 71: 893-906.
- [16] Ganz, H. R., and Thurlimann, B. "Tests on masonry walls under normal and shear loading." Rep. No. 7502-4, Inst. Of Struct. Engrg., ETH Zurich, Zurich, Switzerland (in German),1984.
- روش مدل های رفتاری پیوسته و ترک پخشی ثابت، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [2] Lourenco,P.B., Rots, J. G., J.O. and Blaauwendraad, J, "Continuum model for masonry: Parameter estimation and validation.", *J. Struct. Eng. .*, 1998, 124(6), pp. 642-652.
- [3] Okamura, H. and Maekawa, K, "Nonlinear analysis and constitutive models of reinforced concrete.", *University of Tokyo, Japan*, 1991.
- [4] Maekawa, K., Pimanmas, A., Okamura, H., "Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete." *Spon Press*,2003.
- [۵] بریمانی، امیر حسن. سلطانی محمدی، مسعود. تسنیمی، عباسعلی، "توسعه مدل های رفتاری و تحلیل غیر خطی قاب های بتن مسلح با پرکننده های مصالح بنایی به روش ترک پخشی ثابت"، هفتمین کنفرانس بین المللی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [6] Vecchio F. J., and Collins M. P. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Journal*, 1986; 83(2):219-231
- [7] Hsu T.C, Nonlinear analysis of concrete membrane elements, *ACI Structural J.* 1991, 88(5), P.P.552-561.
- [8] Belletti B., Cerioni R, I. I. Physical approach for reinforced-concrete (PARC) membrane elements, *Journal of Structural Engineering*, 2001, Vol. 127, No. 12, P.P. 1412-1426.
- [9] Soltani M., An X., Maekawa K., Cracking Response and Local Stress Characteristics of RC Membrane Elements Reinforced with Welded Wire Mesh, 2004, *Cement and Concrete Composite*, Elsevier Science, vol. 26, pp. 389-404.