تأثیر نحوه‌ی اعمال ضرایب ترک‌خوردگی دیوارهای برشی بر پاسخ دینامیکی قاب‌های بتن‌آرمه

کامیار خزاعی[۱]

[۱]مسوول واحد تحقیق و توسعه – سازمان عمران شهرداری شیراز

Email: kamyar.khozaei@gmail.com

چکیده

ایجاد ترک‌های کششی در اعضای قاب‌های بتن آرمه سبب کاهش سختی این المان‌ها می‌شود. آیین نامه‌های طراحی روش‌هایی جهت تأثیر این کاهش سختی در مدل سازه‌ای پیشنهاد کرده‌اند. یکی از روش‌های متداول که آیین‌نامه‌ی ACI 318 نیز به آن اشاره کرده است، اعمال ضرایب کاهش دهنده‌ی سختی به اعضای مختلف تحت عنوان ضرایب ترک خوردگی است. تکنیک‌های متفاوتی در اعمال این ضرایب به المان‌های قاب بتنی جهت نزدیک شدن رفتار مدل ریاضی سازه به مدل واقعی آن توسط محققین و مهندسین طراح ارائه شده است. در این تحقیق، یک نمونه قاب بتنی پنج طبقه‌ی سه بعدی با اعمال ضرایب ترک خوردگی با روش‌های مختلف، مدل و تحلیل دینامیکی طیفی شده است. ضرایب مورد نظر با فرض ترک خوردگی دیوار برشی یک بار به پارامترهای دیوار و پارامترهای خمشی المان مرزی ستون، یک بار به پارامترهای خمشی و محوری المان مرزی ستون، یک بار به المان دمبلی و یک بار با توصیه‌ی آیین‌نامه‌ی ACI 318-14 به اعضا اعمال شده است و پاسخ‌های دینامیکی همچون زمان تناوب دینامیکی، ضریب مشارکت مودی، سختی طبقه و جابجایی نسبی طبقات در این حالت‌ها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده، ضریب کاهش سختی باید در سختی محوری ستون المان مرزی تأثیر داده شود تا رفتار مدل به رفتار واقعی نزدیک‌تر شود. همچنین استفاده از ضریب ۰/۵ برای کاهش سختی همگی اعضای سازه در مقابل بارهای جانبی به دلیل کاهش جابجایی نسبی، باعث اقتصادی شدن طرح خصوصا در ابعاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: ضریب ترک خوردگی، المان مرزی، زمان تناوب اصلی، ضریب مشارکت مودی

۱- مقدمه و پیشینه پژوهش

با توجه به رفتار غیر خطی بتن در بارگذاری‌های مختلف، تعیین مشخصات مقاطع بتن‌آرمه در تحلیل‌های خطی برای نزدیک شدن به رفتار غیر خطی نیاز به استفاده از تقریب‌های مناسب دارد. سختی مقاطع بتنی در اثر ایجاد ترک‌های کششی کاهش پیدا می‌کند یا به عبارت دیگر با ایجاد و گسترش ترک‌ها سطح مقطع خالص کاهش پیدا کرده و در نتیجه‌ی آن ممان اینرسی از مقدار خالص کمتر می‌شود. یکی از روش‌های تقریبی در نظر گرفتن این کاهش سختی، استفاده از ضرایب کاهنده‌ی سختی مقطع موسوم به ضرایب ترک خوردگی است [۱]. ضرایب ترک خوردگی ضرایبی کوچکتر از یک هستند که به طور جداگانه به هر یک از مشخصات مقطع مانند ممان اینرسی خمشی، سختی محوری و سختی برشی اعمال می‌شوند تا تأثیر کاهش سختی را به صورت مستقیم بر مقطع اعمال کنند.

آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های بتن‌آرمه این ضرایب را به طور مشخص برای هر عضو سازه‌ای در شرایط مختلف بارگذاری و تنش‌های داخلی ایجاد شده تعیین کرده‌اند. آیین‌نامه‌ی ACI 318-14 در فصل ۶ به طور مفصل به این ضرایب پرداخته است و در جداولی این ضرایب را بسته به نیروهای داخلی ایجاد شده در اعضا تعیین کرده است. همچنین بر اساس این آیین‌نامه در تحلیل‌های ناشی از بارهای ضریب دار جانبی، ضریب ترک خوردگی را می‌توان برای تمام اعضا معادل $0.5I_g$ فرض کرد. با رجوع به جدول‌های ارائه شده در این آیین‌نامه، ضرایب ترک خوردگی پیشنهاد شده برای دیوارها بسته به اینکه ترک خورده باشند یا نباشند به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۷ به دست می‌آید [۲]. در آیین نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ۲۸۰۰ ایران نیز اشاره می‌کند که در سازه‌های بتن‌آرمه در تعیین تغییر مکان نسبی طرح، ممان اینرسی مقطع ترک خورده‌ی قطعات را می‌توان برای تیرها $0.35Ig$، برای ستون‌ها $0.7Ig$ و برای دیوارها $0.35Ig$ یا $0.7Ig$ نسبت به میزان ترک خوردگی آن‌ها منظور کرد [۳].

برای بررسی ترک خوردگی دیوارها، باید در ترکیب بارهای بحرانی که در آن‌ها بیشترین تنش کششی در دیوار به وجود می‌آید مقدار تنش‌های کششی را با تنش کششی ترک خوردگی دیوار مقایسه کرد و ترکیب بارهای مورد نظر برای این کار همان ترکیب بارهای طراحی (بارهای ضریب دار) هستند [۴]. برخی آیین نامه‌ها نیز مقدار ضرایب ترک خوردگی را به شاخص پایداری وابسته کرده‌اند که به عنوان مثال در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران ضریب ترک خوردگی تیرها برای قاب‌های مهارنشده و قاب‌های مهارشده به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۵ توصیه شده است [۵].

تحقیقاتی در زمینه‌ی اعمال ضرایب ترک خوردگی بر المان‌های مختلف سازه‌ای بر پایه‌ی آیین نامه‌ها انجام شده است ولی آنچه اهمیت دارد تفسیر ضوابط آیین نامه و نحوه‌ی اعمال ضرایب به مشخصات المان‌ها بر اساس رفتار سازه‌ای آن‌ها است. به عنوان مثال برخی مراجع ضریب کاهش ممان اینرسی خمشی را بر سختی پیچشی تیر هم اعمال می‌کنند. در مدل‌های تحلیلی اغلب با اعمال وقوع ترک (صرفه نظر از مکان وقوع) ضمن مدل‌سازی آن با مفصل، از مقاومت کششی بتن مقطع صرفه نظر می گردد. در مدل‌های اجزای‌محدود، از دو تکنیک روش ترک‌های جدا شده و روش ترک‌های هاله‌ای استفاده می‌شود. در شیوه‌ی نخست که زمان‌بر هم هست، لازم است المانی که به شرایط ترک‌خوردگی رسیده است به موازات صفحه‌ی‌ترک به دو قسمت تقسیم شده و درجات آزادی جدیدی در شبکه‌ی المان‌ها تعریف گردد ولی در شیوه‌ی دوم اثرات ترک خوردگی با کاهش سختی المان در محاسبات القاء می‌گردد [۶].

یکی از اهداف اصلی این تحقیق معرفی قابلیت‌های جدید نرم افزار ETABS 15.2.2 در مدل سازی دیوار برشی خصوصا حالت رسم Draw Wall Stacks است. علاوه بر این، در نسخه‌ی جدید نرم افزار، قابلیت تحلیل‌های خطی و غیر خطی استاتیکی و دینامیکی بسیار زیاد شده است. بنابراین، علاوه بر اینکه نتایج حاصل از مقایسه‌ی مدل‌های انتخابی در این مقاله ارائه می‌شود، سعی شده است این قابلیت‌های نرم افزاری جهت استفاده‌ی طراحان معرفی شود.

روش‌های متفاوتی در مدل کردن دیوارهای برشی در نرم افزار توسط طراحان و محققین ارائه شده است. یکی از روش‌های متداول ساختن مقاطع دمبلی است. در نرم افزار ETABS 15.2.2 دو راه برای ایجاد این مدل وجود دارد. یکی از روش‌ها این است که دو المان مرزی در ابتدا و انتهای دیوار با استفاده از المان خطی ستون در نرم افزار تعریف شده و در نهایت دیوار و ستون‌های اطراف آن به همدیگر Pier می‌شوند [۷]. در این حالت ضرایب ترک خوردگی ستون‌های کناری معادل دیوار متصل به آن‌ها اعمال می‌شود و باید توجه داشت که به دلیل همپوشانی مقطع دیوار با ستون باید برای رفع خطای همپوشانی اصلاحاتی انجام داد. روش دیگر با استفاده از قابلیت جدید این نسخه از نرم افزار و رسم مستقیم دیوار برشی به شکل دمبلی با گزینه‌ی Draw>Draw Wall Stacks است. در این روش، دیوار و المان‌های مرزی ابتدا و انتهای آن همگی با مقطعی از جنس پوسته مدل می‌شوند که در نسخه‌های قبل از سال ۲۰۱۳ نرم افزار این قابلیت وجود نداشت. روش دیگری که در این تحقیق برای مدل کردن دیوارهای برشی از آن استفاده شده، به این صورت است که المان‌های طولی ستون‌ها حذف شده‌اند و در طول دیوار مقطع یکسان بوده و یک مقطع یکپارچه از نوع Wall به آن اختصاص داده شده است. مزیت این روش علاوه بر سهولت اجرای سازه این است که خطای همپوشانی دیوار و ستون کناری آن از بین رفته و مانند حالت اول نیاز به رفع خطای همپوشانی نیست. همچنین

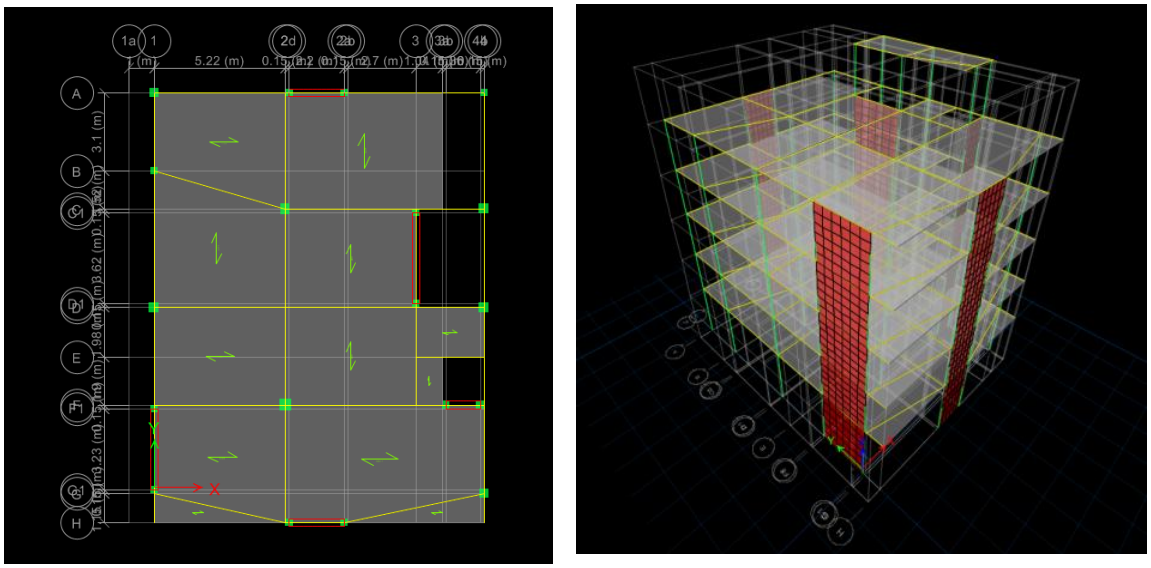
با استفاده از این روش طول ناحیه‌ی المان مرزی با توجه به تنش‌های ایجاد شده در دیوار قابل تعیین و تغییر است. یکی از چالش‌های موجود در مدل اول این است که با توجه به متفاوت بودن المان خطی ستون و المان پوسته‌ای دیوار برشی و اینکه کل مجموعه به عنوان دیوار محسوب می‌شود، باید ضرایب ترک خوردگی به نحوی به ستون‌های چسبیده به دیوار اعمال شوند که نزدیک‌ترین رفتار یکپارچه بین آن‌ها حاصل گردد. به همین منظور روش‌های متفاوتی جهت اعمال ضرایب گسترش پیدا کرده‌اند. آنچه که در این تحقیق به آن پرداخته شده است، نحوه‌ی اعمال این ضرایب بر مشخصات دیوارهای برشی با استفاده از نرم‌افزار و مقایسه‌ی رفتار سازه با اعمال این ضرایب به روش‌های مختلف است.

نظرات گوناگونی توسط طراحان و محققین در حوزه‌ی تحلیل سازه‌های بتن آرمه در زمینه‌ی اعمال این ضرایب وجود دارد که در این تحقیق سعی شده است روش‌های متداول اعمال ضرایب ترک خوردگی با هم مقایسه شود. با توجه به قابلیت‌های بسیار زیاد نرم افزار ETABS 15.2.2 در تحلیل‌های دینامیکی خطی و غیر خطی سازه‌ها، از این نرم افزار جهت به دست آوردن پاسخ‌های دینامیکی طیفی قاب‌های مورد نظر استفاده شده است. در یک قاب بتن‌آرمه‌ی ۵ طبقه‌ی سه بعدی و با استفاده از تحلیل طیفی، پاسخ‌های دینامیکی همچون دوره‌ی تناوب، ضریب مشارکت مودی، سختی طبقات و جابجایی نسبی طبقات در چهار حالت مختلف ارزیابی شده‌اند که در بخش مدل‌سازی در نرم افزار به تفضیل آورده شده است.

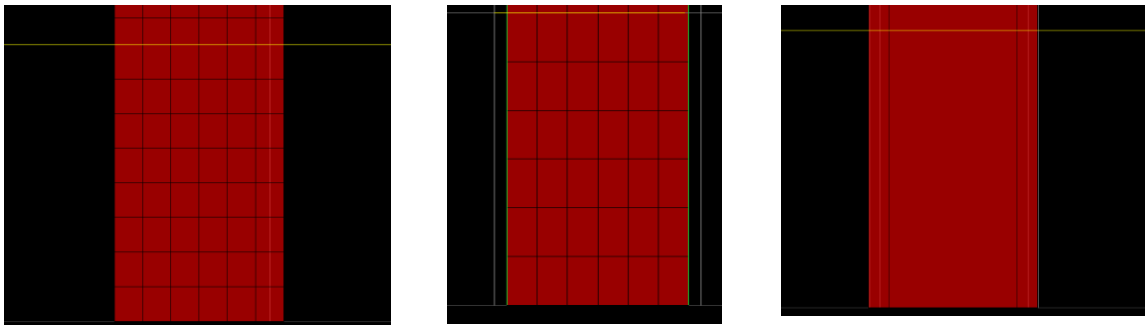
۲- مدل‌سازی در نرم افزار

همان طور که در بخش مقدمه مطرح شد، هدف اصلی این تحقیق ارزیابی حالت‌های مختلف اعمال ضرایب ترک خوردگی بر مشخصات دیوارهای برشی و مقایسه‌ی پاسخ‌های دینامیکی قاب بتن‌آرمه در این حالت‌ها با تأکید بر توانمندی‌های نسخه‌ی جدید نرم افزار است. پیش از بررسی این روش‌ها ابتدا لازم است مشخصات مقاطع معرفی شوند. مقطع یک المان خطی ستون دارای دو ممان اینرسی حول محورهای موازی با مقطع و یک سختی محوری ناشی از سطح مقطع است. این پارامترها در نرم افزار ETABS 15.2.2 به ترتیب با I22، I33 و A معرفی می‌شوند. یک مقطع پوسته‌ای دیوار برشی دارای مشخصات زیادی است. مهمترین آن‌ها عبارتند از سختی محوری ناشی از سطح مقطع، سختی برشی و ممان اینرسی خمشی حول هر سه محور مقطع. این پارامترها در نرم افزار به ترتیب F22، F12، M11، M22 و M12 معرفی می‌شوند. برخی مراجع معتقدند که ضریب ترک خوردگی به پارامتر f11 دیوار خصوصا دیوارهای دارای بازشو نیز اختصاص داده شود [۸]. مسأله‌ی اساسی در اینجا نحوه‌ی اعمال ضرایب کاهش سختی یا همان ضرایب ترک خوردگی به هر کدام ازین پارامترها است. به همین منظور برای هر کدام از قاب‌ها چهار حالت اعمال ضرایب در نظر گرفته شده است.

طول کل دیوارهای برشی به طوری در نظر گرفته شده‌اند که همگی در نتیجه‌ی تحلیل در اثر بار جانبی دچار ترک خوردگی شده و ضریب ترک خوردگی آن‌ها ۰/۳۵ منظور شده است. در مدل اول، دیوار با المان مرزی ستونی مدل شده و ضریب ترک خوردگی خمشی ستون‌ها حول هر دو محور معادل ۰/۳۵ اعمال شده است در حالی که این ضریب به سطح مقطع ستون‌ها اعمال نشده است. در مدل دوم، جهت یکپارچه شدن رفتار ستون‌ها و دیوار برشی ضریب ترک خوردگی به سطح مقطع ستون‌ها که همان سختی محوری ستون‌ها هست هم اعمال شده است. در مدل سوم، دیوار با استفاده از گزینه‌ی Draw>Draw Wall Stacks و با استفاده از المان دمبلی نرم افزار ترسیم شده است و ضرایب ترک خوردگی مانند یک دیوار یکپارچه و به پارامترهای F22، M11، M22 و M12 اعمال شده است. در مدل چهارم، المان مرزی ستونی از ابتدا و انتهای دیوار حذف شده و مقطع دیوار به طور یکپارچه با مقطع Wall مدل شده است. در این حالت ضریب ترک خوردگی مانند مدل سوم اعمال شده است. جدول ۱ مشخصات مدل‌ها و نحوه‌ی اعمال ضرایب در نرم افزار را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ضریب ترک خوردگی تمامی تیرها ۰/۳۵ و ستون‌ها نیز ۰/۷ منظور شده است. شکل ۱ پلان و نمای سه بعدی قاب مورد تحلیل را نشان می‌دهد. شکل ۲ دیوار را در حالت‌های مختلف مدل سازی در نرم افزار نشان می‌دهد.



شکل ۱. پلان و نمای سه بعدی قاب مورد تحلیل



شکل ۲ (الف) **شکل ۲ (ب)** **شکل ۲ (پ)**

شکل ۲. دیوار در حالت‌های الف) المان دمبلی نرم افزار، ب) المان مرزی ستون، پ) بدون المان مرزی

جدول ۱ مشخصات مدل‌های نرم افزاری

نام مدل	ضخامت دیوار (mm)	نوع المان مرزی (mm x mm)	ضریب کاهش سختی دیوار				ضریب کاهش سختی المان مرزی		
			F22	M11	M22	M12	I22	I33	A
۱	۳۰۰	ستون ۳۰۰X۳۰۰	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۱/۰
۲	۳۰۰	ستون ۳۰۰X۳۰۰	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵
۳	۳۰۰	المان دمبلی نرم افزار	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	–	–	–
۴	۳۰۰	بدون مقطع ستون	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	–	–	–
۵	۳۰۰	المان دمبلی نرم افزار	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	–	–	–

از آنجایی که جرم ساختمان برای محاسبه‌ی دوره‌ی تناوب اصلی نوسان مورد نیاز است، جهت اعمال جرم ساختمان به نرم افزار از روش آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم استفاده شده است. در این روش جرم ساختمان از مجموع بار مرده و درصدی از بار زنده‌ی طبقات ناشی می‌شود [۳]. بنابراین در نرم افزار در بخش Mass Source گزینه‌ی From Loads فعال شده است. بارهای مرده و زنده‌ی طبقات به ترتیب ۴/۴ و ۲ کیلونیوتن بر متر مربع به کف‌ها اعمال شده است. همچنین مشخصات مصالح معرفی شده به نرم افزار در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ مشخصات مصالح

Es(GPa)	Ec(GPa)	fys(MPa)	fy(MPa)	f 'c (MPa)
200000	21000	300	400	21

۳- شرایط تحلیل طیفی

برای انجام تحلیل طیفی از طیف بازتاب آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم استفاده شده است. در ویرایش چهارم آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ ضریب بازتاب به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$
\begin{aligned}
&B=B_1N \\
&B_1= S_0+(S-S_0+1)(T/T_0) \qquad 0<T<T_0 \\
&B_1= S+1 \qquad T_0<T<T_s \\
&B_1=(S+1)/(T_s/T) \qquad T>T_s
\end{aligned}
\tag{۱}
$$

با توجه به اینکه زمان تناوب تجربی قاب‌های مورد نظر کمتر از ۰/۷ ثانیه است ضریب N معادل ۱/۰ در نظر گرفته می‌شود. شهر محل تحلیل طیفی شیراز بوده و خاک مورد نظر از نوع تیپ III منظور شده است. بر اساس این پارامترها شتاب طیفی به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$S_a = \left(\frac{AI}{Ru}\, g\right) B \tag{۲}$$

که در این رابطه g شتاب ثقل زمین و برابر با $9.81\ m/s^2$ در نظر گرفته است. عبارت داخل پرانتز همان ضریب مقیاس است که با توجه به ضریب رفتار ۶ برای قاب مورد نظر به عنوان قاب خمشی بتن‌آرمه متوسط + دیواربرشی متوسط ۰/۴۹۰۵ به دست می‌آید. جهت همپایه سازی برش پایه‌ی تحلیل دینامیکی و تحلیل استاتیکی، ضریب زلزله‌ی استاتیکی نیز با اعمال ضریب $\rho=1.2$ معادل ۰/۱۶۵ محاسبه شده و به نرم افزار اعمال شده است. پاسخ‌های به دست آمده از تحلیل دینامیکی طیفی با ۱۰۰ درصد پاسخ‌های استاتیکی هم‌پایه شده‌اند.

۴- بحث در نتایج

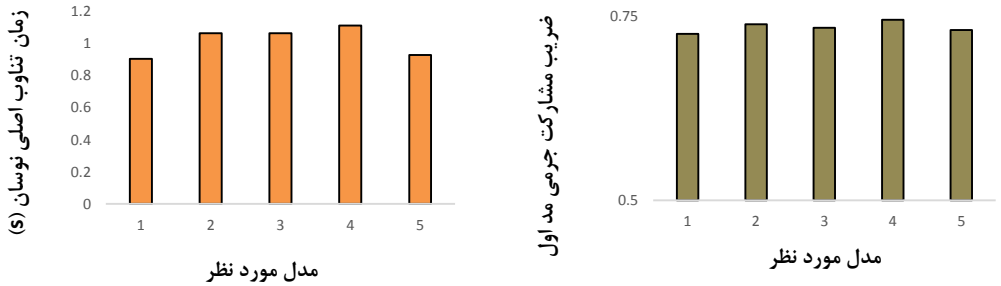
در این تحقیق، دو قاب بتن‌آرمه‌ی سه بعدی ۵ طبقه مورد تحلیل دینامیکی طیفی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از تحلیل طیفی مدل قاب‌های مورد نظر در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ نتایج حاصل از تحلیل طیفی

نام مدل	زمان تناوب اصلی نوسان (s)	ضریب مشارکت جرمی مود اول	طبقه	سختی (kN/m)	جابجایی نسبی(m)
			۵	۴۴۸۴۶	۰/۰۱۵
			۴	۸۰۸۵۲	۰/۰۱۴
۱	۰/۹	۰/۷۲۶	۳	۱۱۸۱۰۰	۰/۰۱۳
			۲	۱۵۵۷۴۳	۰/۰۱۱
			۱	۲۷۴۱۷۸	۰/۰۰۶
			۵	۳۶۳۶۷	۰/۰۱۸
			۴	۶۱۰۳۵	۰/۰۱۹
۲	۱/۰۶	۰/۷۳۹	۳	۸۶۱۷۸	۰/۰۱۷
			۲	۱۱۲۳۰۵	۰/۰۱۵
			۱	۱۹۳۵۴۸	۰/۰۰۹
			۵	۳۲۴۱۱	۰/۰۱۷
۳	۱/۰۶	۰/۷۳۴	۴	۵۸۲۴۹	۰/۰۱۸
			۳	۷۹۷۶۶	۰/۰۱۸

۰/۰۱۵	۱۱۰۵۲۰	۲			
۰/۰۰۹	۲۰۸۸۳۵	۱			
۰/۰۱۸	۳۵۲۹۹	۵			
۰/۰۱۹	۵۶۹۵۴	۴			
۰/۰۱۸	۷۹۱۳۹	۳	۰/۷۴۵	۱/۱۰۸	۴
۰/۰۱۶	۱۰۲۲۴۴	۲			
۰/۰۱۰	۱۷۳۶۵۱	۱			
۰/۰۱۴	۴۲۲۲۵	۵			
۰/۰۱۵	۷۶۷۶۷	۴			
۰/۰۱۴	۱۰۶۱۸۰	۳	۰/۷۳۱	۰/۹۲۵	۵
۰/۰۱۲	۱۴۶۰۰۳	۲			
۰/۰۰۷	۲۷۰۶۸۳	۱			

بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول ۳، در بین مدل‌های اول تا چهارم که همگی با ضرایب ترک خوردگی ۰/۳۵ تحلیل شده‌اند، مدل اول کمترین زمان تناوب را به خود اختصاص داده است و این بدان معنی است که بیشترین سختی را در بین این چهار مدل داشته اشت. سختی طبقات مدل اول نسبت به مدل دوم در محدوده‌ی ۲۵٪ تا ۳۵٪ بیشتر بوده است که دلیل اصلی این رفتار، عدم کاهش سختی محوری المان مرزی در مدل اول است. این روند در مقایسه‌ی جابجایی‌های نسبی دو مدل هم برقرار است و جابجایی‌های نسبی مدل اول نسبت به مدل دوم بین ۲۵٪ تا ۳۵٪ کمتر بوده است. از آنجایی که دیوار و المان مرزی در سازه‌ی واقعی به شکل یکپارچه عمل می‌کنند، رفتار مدل دوم نسبت به مدل اول به رفتار واقعی سازه نزدیک‌تر است و توصیه می‌شود از مدل اول به دلیل عدم رفتار یکپارچه‌ی دیوار و المان مرزی ستون جهت طراحی قاب‌های بتن آرمه استفاده نشود. با مقایسه‌ی زمان تناوب مدل‌ها در جدول مشخص می‌شود که زمان تناوب اصلی نوسان مدل دوم و سوم دقیقا معادل هم به دست آمده است. با توجه به اینکه رابطه‌ی زمان تناوب با سختی نسبت عکس دارد و جرم مدل‌ها برابر بوده است، این پدیده نشان دهنده‌ی یکسان بودن سختی کل سازه در هر دو مدل است. زمان تناوب اصلی نوسان مدل پنجم به مدل اول بسیار نزدیک است. علی رغم آنکه ضریب ترک خوردگی اعمال شد به اعضای مدل پنجم با مدل اول کاملا تفاوت دارد و ضریب ۰/۵ به تمامی اعضای آن اعمال شده است اما همان‌طور که در جدول ۳ مشهود است، زمان تناوب، سختی و جابجایی نسبی آن با تقریب بسیار خوبی به مدل اول نزدیک است. در شکل ۳ نمودارهای زمان تناوب اصلی نوسان و نسبت مشارکت جرمی مد اول نوسان نمونه‌ها با هم مقایسه شده‌اند.



شکل (الف) **شکل ۳ (ب)**

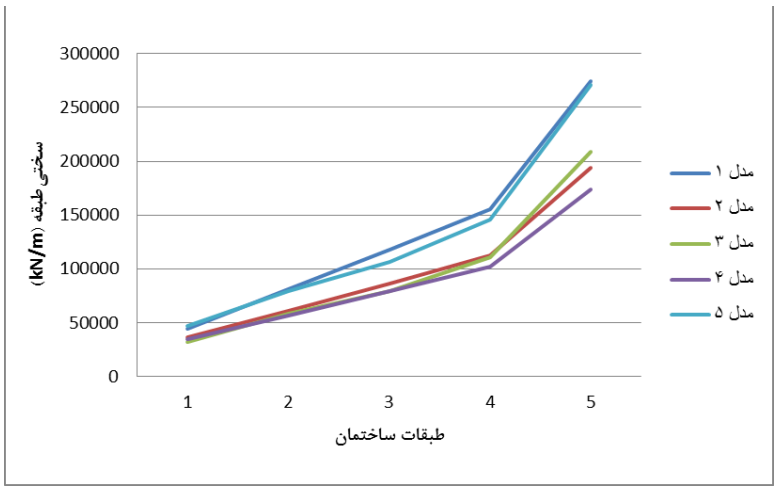
شکل ۳. مقایسه‌ی الف) زمان تناوب اصلی نوسان مدل‌ها ب) ضریب مشارکت جرمی مود اول نوسان مدل‌ها

همچنین ضریب مشارکت جرمی مد اول هر دو مدل بسیار نزدیک است. شکل ۳ نمودارهای سختی و جابجایی نسبی طبقات در هر ۵ مدل را به ترتیب در مقایسه با هم نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۳ نمودارهای سختی مدل دوم و سوم تقریبا بر روی هم منطبق شده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از هر کدام از مدل‌های دوم و سوم به رفتار مشابهی از سازه منجر خواهد شد و هم می‌توان از المان دمبلی آماده در نرم افزار ETABS 15.2.2 استفاده کرد و هم می‌توان با استفاده از المان ستونی و اعمال ضریب ترک خوردگی به سختی محوری ستون به همین نتیجه دست پیدا کرد.

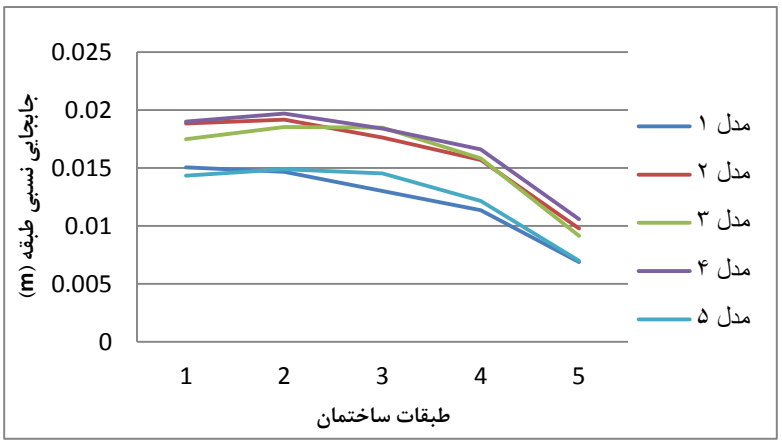
با دقت در شکل۴ دیده می‌شود که سختی مدل چهارم نیز از طبقه‌ی دوم تا پنجم بر نمودارهای دوم و سوم تقریبا منطبق شده است با این تفاوت که در طبقه‌ی اول این سختی تا حدودی کاهش یافته است. این تغییر سختی در طبقه‌ی اول در حدود ۱۷٪ بوده است و افزایش زمان تناوب کلی سازه این مسأله را نشان می‌دهد. مدل چهارم با توجه به اینکه به صورت یکپارچه و با المان Wall ساخته شده است، نزدیکترین رفتار را به واقعیت از خود نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت اگر از مدل چهارم استفاده شود به نتایج نزدیک‌تر به واقعیت و در عین حال محافظه کارانه‌تری نسبت به بقیه‌ی مدل‌ها خواهیم رسید. دلیل کمتر شدن نسبی سختی کل سازه به احتمال زیاد به از بین رفتن همپوشانی دیوار و ستون مجاور آن در مدل مربوط می‌شود. در مقایسه‌ی مدل‌های دوم، سوم و چهارم می‌توان گفت استفاده از هر کدام از این مدل‌ها می‌تواند منجر به جواب‌های منطقی و نزدیک به هم شود و از آنجایی که به دلایل متفاوت همچون رعایت طول مهاری میلگردهای تیرها نیاز به وجود ضخامت‌های بیشتر دیوار در ابتدا و انتهای آن داریم، بنابراین استفاده از دیوار به شکل دمبلی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. توصیه می‌شود در بین مدل‌های دوم، سوم و چهارم و با توجه به قابلیت جدید نرم افزار ETABS 15.2.2 در ساختن دیوار دمبلی شکل، از مدل سوم برای طراحی استفاده شود و دیوارها با استفاده از گزینه‌ی Draw Wall Stacks رسم و مدل شوند.

همانطور که از جدول ۳ برمی‌آید، روش‌های مختلف اعمال کاهش سختی تأثیر زیادی بر ضریب مشارکت جرمی مد اول نوسان مدل‌ها نداشته است و این ضریب برای تمامی مدل‌ها بسیار به هم نزدیک به دست آمده است.

با بررسی نتایج به دست آمده از مدل پنجم و مشاهده‌ی نمودارهای سختی و جابجایی نسبی، آشکار است که سختی کلی سازه به نسبت دیگر مدل‌ها افزایش یافته است. این افزایش سختی نسبت به مدل‌های دوم تا چهارم به طور میانگین در حدود ۲۵٪ تا ۳۰٪ بوده است. هر چند بر اساس توصیه‌ی ACI 318-14 در مقابل بار جانبی ضریب ترک خوردگی ستون‌ها از ۰/۷ به ۰/۵ کاهش یافته است ولی سختی تیرها و دیوارها افزایش داشته است. این نشان می‌دهد که استفاده از آیین نامه‌ی ACI ویرایش ۲۰۱۴ موجب افزایش سختی و کاهش جابجایی نسبی طبقات شده و به طراح این امکان را می‌دهد که سازه را در مقابل بارهای جانبی اقتصادی‌تر طراحی کند.



شکل ۴ (الف)



شکل ۴ (ب)

شکل ۴ نمودارهای الف) سختی طبقات، ب) جابجایی نسبی طبقات

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق نحوه‌ی اعمال ضرایب ترک خوردگی بر مشخصات مقطع المان‌های قاب بتن آرمه بررسی گردید و تأثیر آن بر پاسخ‌های تحلیل دینامیکی طیفی ارزیابی شد. یک قاب ۵ طبقه‌ی سه بعدی بتن آرمه در پنج حالت تغییر سختی اعضا تحلیل شد و نتایج به شرح زیر به دست آمد:

۱- نرم افزار ETABS 15.2.2 دارای قابلیت ساختن دیوار به شکل دمبلی است و می‌توان المان مرزی با ضخامت متغیر را در دیوار به صورت یکپارچه مدل کرد.

۲- با مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل مدل اول نسبت به مدل دوم و سوم درمی‌یابیم که یکی از پارامترهای مهم در اعمال ضریب ترک خوردگی، سطح مقطع ستون المان مرزی است که اگر اعمال نشود، سختی جانبی قاب به شکل غیر واقعی در محدوده‌ی ۲۵٪ تا ۳۵٪ افزایش می‌یابد.

۳- رفتار قاب در صورت استفاده از عضو ستون به عنوان المان مرزی و اعمال ضریب ترک خوردگی به سطح مقطع ستون، با تقریب بسیار زیادی به رفتار المان دمبلی شکل نرم افزار نزدیک است.

۴- استفاده از المان Wall به صورت یکپارچه و در تمام طول دیوار رفتاری نزدیک به مدل‌های با المان مرزی داشته با این تفاوت که کاهش سختی کمتر از ۱۵٪ در کل سازه از خود نشان داده و نتایج تحلیل آن محافظه کارانه‌تر به نظر می‌رسد.

۵- آیین نامه‌ی ACI 318-14 در فصل ششم استفاده ازضریب کاهش سختی ۰/۵ را برای تمامی اعضا در مقابل بار جانبی مجاز دانسته است و با توجه به نتایج به دست آمده از مدل پنجم می‌توان دریافت که استفاده از این ضرایب در طراحی سازه با توجه به کاهش قابل توجه Drift طبقات در حدود ۲۵٪ تا ۳۰٪، منجر به اقتصادی شدن طرح خصوصا در ابعاد می‌گردد.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به قابلیت‌های زیاد برنامه‌ی ETABS 15.2.2 در ساختن و تحلیل المان‌های دیوار از جمله مقاطع دیوار با ضخامت‌های متغیر (مقطع دمبلی) به صورت مستقیم، توصیه می‌شود جهت تحلیل و طراحی دیوارها از این قابلیت استفاده شود تا ضمن یکپارچه رفتار کردن دیوار در مدل، خطای همپوشانی دیوار و ستون نیز از بین رفته و رفتار مدل نرم افزاری به رفتار واقعی سازه نزدیک شود.

۶- قدردانی

در انتها از جناب آقای مهندس مستمع، ریاست محترم سازمان عمران و بازآفرینی فضاهای شهری شهرداری شیراز به جهت حمایت‌ها و پشتیبانی همه جانبه‌ی ایشان در انجام امور تحقیقاتی کمال تشکر را داریم.

۷- مراجع

[1] Moehle J. Seismic design of reinforced concrete buildings, America, Mc Graw Hill, page 33, 2015.

[2] ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, 2014.

[۳] آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، ویرایش چهارم، تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن وزارت راه و شهرسازی، صفحه ۴۷، سال ۱۳۹۴.

[۴] سلطان آبادی، رضا. جعفری، احمدرضا. طراحی سازه‌های بتنی با نرم افزار ETABS 2013. چاپ دوم، تهران، انتشارات نگارنده‌ی دانش، صفحه ۷۷۰، سال ۱۳۹۳.

[۵] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه، چاپ چهارم، تهران، وزارت راه و شهرسازی، صفحه ۱۸۶، ۱۳۹۲.

[۶] ابراهیم‌پور کومله، هومن.، (۱۳۹۰)، "تحلیل غیر خطی اجزای محدود تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با ورقFRP به روش تسلیح خارجی با نصب روی شیارهای طولیEBROG."، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

[۷] طلایی طبا، بهزاد. عرشیان، امیر حسین. طراحی آیین نامه‌ای سازه‌های بتن آرمه، چاپ سوم، تهران، انتشارات عابد، صفحه ۳۶۳، ۱۳۹۱.

[۸] دستورالعمل ۱-۱۰۸-۹۵، الزامات تکمیلی طراحی سازه‌های بتن آرمه، ویرایش اول، شیراز، معاونت شهرسازی و معماری شهرداری شیراز، صفحه‌ی ۳، ۱۳۹۵.

Effect of reducing stiffness ratio applications on dynamic responses of RC frames

Kamyar Khozaei[1]
[1]**Head of R&D department – Shiraz Municipality**

Abstract

Stiffness of RC members decreases due to tension cracks. Different methods have been recommended by code to considering this effects. The most common method presented by ACI 318 is stiffness reducing ratios. These ratios applied to members by different techniques recommended by researches. In this paper, a five stories RC frame modeled by different application of reducing ratios and analyzed by linear spectrum analysis. These ratios applied to flexural stiffness and axial stiffness of boundary element in five different models and dynamic responses of structure such as period, modal participation ratio, story stiffness and story drifts were considered. According to the results, stiffness reducing ratios must applied to axial stiffness of boundary element to converge the behavior of model and actual structure. Also, using $0.5I_g$ for all members under lateral loads might be an economical treats.

Keywords: stiffness ratio, boundary element, period, modal participation ratio