

ارزیابی تجربی تاثیر الگوهای مختلف بارگذاری سیکلی بر رفتار مکانیکی تیرهای بتن آرمه خودتراکم الیافی

حمیدرضا توکلی

استاد یار و عضو هیات علمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران
tavakoli@nit.ac.ir

بدرام جلالی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران
pedramja@yahoo.com

کلید واژه‌ها: بتن خودتراکم، بتن الیافی، بارگذاری شبه استاتیکی، بارگذاری سیکلی، الگوهای بارگذاری

چکیده

از زمان رواج طراحی لرزه‌ای بر مبنای عملکرد توسط آیین‌نامه‌های مختلف، نیاز به تعیین الگوهای بارگذاری نماینده پرنرنگتر شده است. مناسب‌ترین روش برای ارزیابی عملکرد اعضای سازه‌ای، شبیه‌سازی تاریخچه بارگذاری می‌باشد که المان سازه‌ای حین زلزله متحمل خواهد شد. هدف یک الگوی بارگذاری نیز دستیابی به این مهم به شیوه محافظه‌کارانه می‌باشد. به دلیل مشابه نبودن هیچ دو زلزله رویداده در واقعیت، الگوی بارگذاری نماینده یکتا و بهتری وجود ندارد. موضوع مهم محاسبه اثرات تخریبی تجمعی بواسطه بارگذاری سیکلی خواهد بود. اگر تخریب تجمعی وجود نداشته باشد، نیازی به بارگذاری سیکلی نخواهد بود. تعداد و دامنه سیکل‌های اعمالی به نمونه ممکن است از مطالعات تحلیلی حاصل شود که در آن مدل سیستم‌های سازه‌ای نماینده در معرض تحریکات زمین ناشی از زلزله نماینده قرار گرفته و پاسخ به صورت آماری مورد بررسی قرار می‌گیرد. الگوهای بارگذاری متعدد با تاریخچه کمی متفاوت توسط آیین‌نامه‌های مختلف پیشنهاد شده‌اند که این تفاوت مربوط به جزئیات آنها بوده و نه مفاهیم پایه‌ای. در این تحقیق به بررسی برخی از این الگوها پرداخته شده است. بدین منظور نمونه‌های بتنی از ۴ طرح اختلاط شامل بتن خودتراکم حاوی الیاف فلزی (۰.۱، ۰.۲ و ۰.۳ درصد حجمی) و بتن فاقد الیاف به عنوان بتن مرجع تحت ۳ نوع تاریخچه بارگذاری قرار گرفته تا خصوصیات رفتاری این نوع بتن تحت بارگذاری‌های متفاوت مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد تا زمانی که دامنه‌های بارگذاری سیکلی کم می‌باشد، در تمامی الگوها نمونه رفتار خطی از خود نشان داده و پارامترهایی همچون سختی و مقاومت با اعمال سیکل‌های بیشتر تغییر چندانی نداشته، همچنین استهلاک انرژی و مقادیر میرایی نیز در عضو ناچیز خواهد بود اما پس از ورود به ناحیه غیرخطی، از طرفی با افزایش تعداد سیکل‌ها سختی و مقاومت کاهش یافته و از طرف دیگر استهلاک انرژی و مقادیر میرایی با توجه به نوع الگو به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت.

مقدمه

بتن خود تراکم^۱ به عنوان یک پیشرفت در ساخت بتن در دو دهه اخیر معرفی شد. با اینکه در آغاز توسعه این بتن نیروی کار متخصص برای آن بسیار کمیاب بود، اما با این حال امتیازات اقتصادی بسیار زیادی را به اثبات رساند. در ابتدا تکنولوژی ساخت بتن خود تراکم در کشور ژاپن توسعه پیدا کرد و امکان ساخت آن با رشد و توسعه فوق روان‌کننده‌ها به سرعت فراهم شد. هم اکنون بتن خود تراکم در سرتاسر اروپا مورد استقبال قرار گرفته و هم برای کارهای ساختمانی و هم ساخت قطعات پیش ساخته فراوان دارد. ژاپنی‌ها از سال ۱۹۹۰ به بعد از بتن خود تراکم که نیاز به هیچ ویبره‌ای نداشت و به تراکم کامل می‌رسید در ساخت پل‌ها، تونل‌ها و ساختمان‌ها استفاده کرده‌اند، ملاح (۱۳۸۴) و (Skarendahl and Petersson, 2000).

تحت بارگذاری سیکلی، بتن دچار خسارت کششی شدید شده، بتن و باند دچار زوال می‌شوند زیرا به طور متناوب تحت کشش و فشار قرار می‌گیرد. خسارت شدید بتن ناشی از بارگذاری تناوبی باعث افت در ظرفیت باربری و شکل پذیری می‌شود. به منظور افزایش عملکرد سازه

1- Self Compacting Concrete (SCC)



تحت بارگذاری لرزه‌ای، استفاده از الیاف موضوع بسیاری پروژه‌های تحقیقاتی اخیر بوده است (Filiatrault et al., 1995) و (Kimura et al., 2007). بهبودها شامل افزایش انرژی تلف شده و کاهش دامنه کرنش بوده است (Daniel and Loukili, 2002).


زمین لرزه‌های به وقوع پیوسته، مجموعه‌ای از حرکات نیرومند زمین می‌باشد که جنبش‌هایی را به صورت حرکات رفت و برگشتی در پای سازه‌ها ایجاد کرده و سبب ارتعاش سازه می‌گردد. هیچگاه نمی‌توان الگوی مشخصی برای این نوع حرکات تعیین نمود به همین دلیل جهت شبیه‌سازی حرکت رفت و برگشتی یک زلزله می‌توان از نمونه‌های بارگذاری خاصی تحت عنوان الگوهای بارگذاری سیکلی یا چرخه‌ای استفاده نمود، آیین‌نامه‌های طراحی و بهسازی لرزه‌ای مختلف در دنیا، هر یک الگوهای بارگذاری خاصی را به عنوان نمونه‌ای از چگونگی حرکت زمین و تاثیر آن بر المان‌های سازه ارائه داده‌اند و پارامترهای خاصی از قبیل تغییرمکان براساس درصدی از تغییرمکان تسلیم و یا تغییرمکان نسبی دو انتهای یک المان را برای کنترل نحوه بارگذاری مدنظر قرار داده‌اند. توجه به این نکته ضروری است که هیچ‌یک از این نوع الگوهای بارگذاری به طور قطع الگوی درست و منطبق با یک زلزله را توصیف نمی‌کند حال آنکه یک زلزله ممکن است حاوی ترکیبی از این الگوها باشد. دلیل تعدد در الگوهای مختلف پیشنهاد شده توسط افراد و آیین‌نامه‌های مختلف نیز همین عدم قطعیت در برآورد چگونگی حرکات زمین می‌باشد.

روش کار آزمایشگاهی

۱- مصالح مصرفی

در ساخت نمونه‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند از فوق روان‌کننده^۱ نسل سوم بر پایه پلی‌کربوکسیلیک اتر استفاده شده است. این ماده در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد دارای وزن مخصوصی برابر با ۱.۱ گرم بر سانتیمتر مکعب دارا می‌باشد. الیاف مصرفی در نمونه‌های آزمایش شده، الیاف فولادی می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات الیاف فولادی

الیاف	شکل ظاهری	مدول الاستیسیته GPa	طول (mm)	قطر (mm)	نسبت منظر
فولادی		۱۶۰	۳۶	۰.۷	۵۰

شن مصرفی در بتن دارای حداکثر ابعاد ۱۲.۵ میلیمتر و ماسه مصرفی نیز زیر الک ۴.۷۵ میلیمتر انتخاب شده است و دارای هم‌ارز ماسه ای ۸۰ درصد بوده و منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها در محدوده استاندارد ASTM می‌باشد. در ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان پرتلند تیپ ۲ مازندران و پودر سنگ با وزن مخصوص ۲.۶ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شده است.

۲- طرح اختلاط

در این تحقیق ۴ طرح اختلاط شامل نمونه‌های حاوی الیاف فولادی (۰.۱، ۰.۲ و ۰.۳ درصد حجمی) و طرح اختلاط فاقد الیاف به عنوان نمونه شاهد مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. در تمامی ۴ طرح اختلاط بررسی شده در این تحقیق که در جدول ۲ ارائه شده است، به غیر از مقدار الیاف، تمامی اجزای تشکیل‌دهنده بتن ثابت در نظر گرفته شده است. نسبت آب به سیمان (w/c) برابر با ۰.۳۹ می‌باشد (Vf موجود در جدول ۲ همان درصد حجمی الیاف بوده که برابر با نسبت حجم الیاف به حجم بتن می‌باشد).

جدول ۲: طرح اختلاط بتن (kg/m³)

فوق روان‌کننده	آب	سیمان	پودر سنگ	ماسه	شن	مقدار الیاف (Vf) %	شماره طرح
7	162	413.1	288.9	826	722	-	cont
7	162	413.1	288.9	826	722	0.1	St 10
7	162	413.1	288.9	826	722	0.2	St 20
7	162	413.1	288.9	826	722	0.3	St 30

۳- نگهداری و عمل آوری نمونه ها

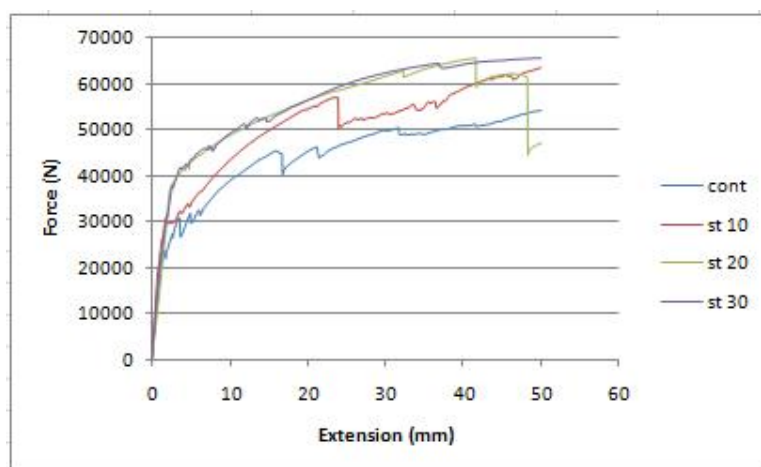
پس از اتمام پروسه اختلاط و ساخت، بتن در قالب ها ریخته شده و تا ۲۴ ساعت در داخل قالب ها و در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شده است. پس از آن، نمونه ها از قالب خارج شده و در استخر آب با دمای ۲۲-۲۵ درجه سانتیگراد تا زمان آزمایش قرار گرفته اند. (نمونه ها پس از ۲۸ روز نگهداری در استخر مورد آزمایش قرار گرفته اند). تصاویر مربوط به زمان بتن ریزی درون قالب ها و قرار گیری تیر های بتنی درون استخر در شکل ۱ نشان داده شده است. هر طرح اختلاط شامل ۴ عدد تیر بتنی به ابعاد ۱۵*۲۰*۱۳۰ سانتیمتر بوده که تحت آزمایش خمش در حالت های بارگذاری یکطرفه^۱ و چرخه ای^۲ قرار گرفته اند.



شکل ۱: بتن ریزی درون قالب ها و نگهداری نمونه ها درون استخر

آزمایشات انجام شده

بارگذاری بر روی نمونه ها در حالت سیکلی با استفاده از سه نوع الگوی بارگذاری و در حالت بارگذاری بصورت کنترل تغییر مکان انجام شده است. الگوهای بارگذاری اعمال شده به نمونه ها شامل ۳۰ سیکل بوده که در حالت تغییر مکان کنترل شامل دامنه های ۵۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۵۰٪ تغییر مکان تسلیم بوده (به ترتیب دامنه بارگذاری اول در ناحیه الاستیک و با دامنه تغییر مکانی به مراتب کوچکتر از تغییر مکان تسلیم، بارگذاری دوم در نزدیکی محدوده تسلیم عضو بوده و بارگذاری سوم با دامنه ای در محدوده رفتار غیرخطی عضو به کار گرفته شده و موجب پیشروی در ناحیه پلاستیک عضو خواهد شد) که یک پارامتر وابسته به مشخصات نمونه می باشد. به علت استفاده از الیاف با مقادیر مختلف در هر طرح اختلاط، خصوصیات رفتاری نمونه ها با طرح اختلاط های مختلف با یکدیگر متفاوت می باشد به همین دلیل جهت تعیین پارامتر مذکور ابتدا یک آزمایش بارگذاری یکطرفه برای هر طرح اختلاط انجام شده و سپس بر اساس نمودارهای بدست آمده که در شکل ۲ نشان داده شده است، مقادیر دامنه های بارگذاری مشخص شده است که نتایج آن در جدول ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲: نتایج آزمایش بارگذاری یکطرفه

- 1- Monotonic
- 2- Cyclic



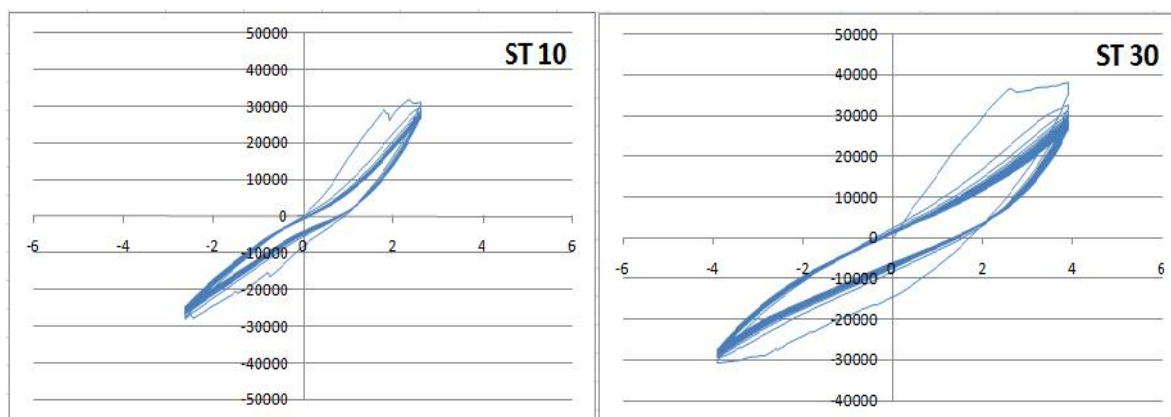
مقادیر دامنه بارگذاری مربوط به الگوهای عملی به نمونه‌ها بدست آمده از منحنی رفتار یکطرفه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر دامنه‌های بارگذاری

طرح اختلاط	تغییر مکان تسلیم (mm)	دامنه بارگذاری (mm)	
		50% y	100% y
cont	1.45	0.725	1.45
		1.45	2.175
		2.175	2.175
St 10	1.85	0.925	1.85
		1.85	2.775
		2.775	2.775
St 20	2.3	1.15	2.3
		2.3	3.45
		3.45	3.45
St 30	2.6	1.3	2.6
		2.6	3.9
		3.9	3.9

بررسی نتایج

منحنی‌های نیرو - تغییرمکان حاصل از بارگذاری نمونه‌های ST20 و ST30 با دامنه ۱۵۰٪ تغییرمکان تسلیم در حالت کنترل تغییر مکان به عنوان نمونه در شکل ۳ ارائه شده است.

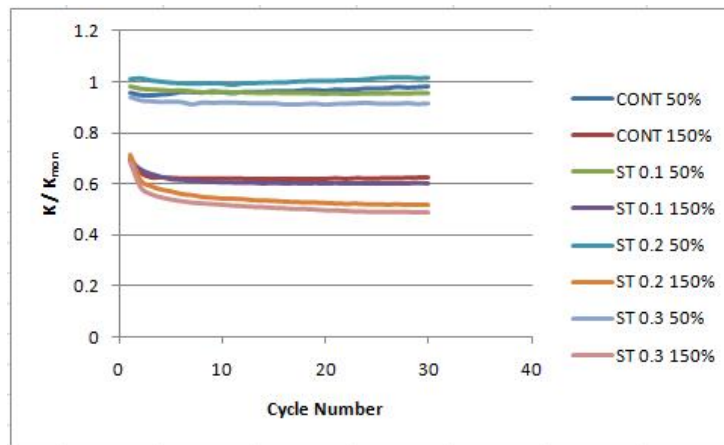


شکل ۳: حلقه‌های هیستریزس نمونه آزمایش شده

پارامترهای ذکر شده در این بخش از مقایسه منحنی رفتاری سیکلی نمونه‌ها بعد از تجربه بارهای سیکلی، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

۱- سختی

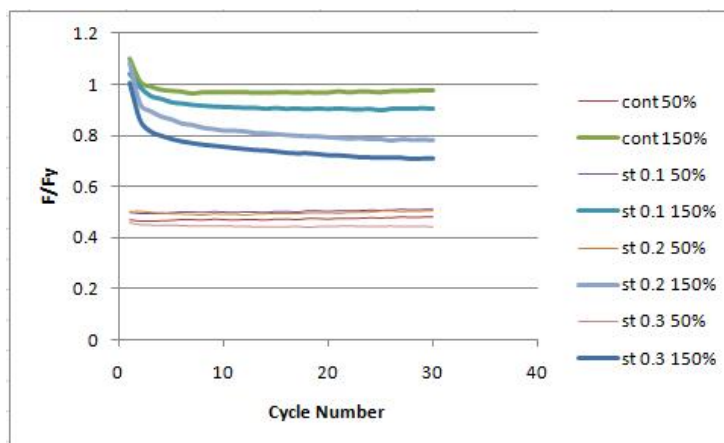
نتایج ارائه شده در شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری مقدار انرژی تجمعی ورودی به عضو بیشتر شده و در نتیجه سختی عضو کاهش می‌یابد. در صورتی که دامنه‌های بارگذاری سیکلی اعمال شده در ناحیه رفتار خطی عضو باشد، این مقدار افت در طول سیکل‌های اعمالی بسیار ناچیز بوده و در تعداد سیکل‌های کم قابل صرف نظر کردن می‌باشد اما در صورت اعمال سیکل‌هایی با دامنه‌های به مراتب بزرگتر از تغییرمکان تسلیم عضو، افت سختی قابل توجه خواهد بود. در این حالت نرخ کاهش سختی عضو در سیکل‌های اولیه بارگذاری بیشتر بوده که دلیل آن ایجاد ترک‌های اصلی در سیکل‌های اولیه بارگذاری می‌باشد در حالیکه در تعداد سیکل‌های بالاتر، تغییر شکل اعمال شده در عضو تنها باعث باز و بسته شدن ترک‌های ایجاد شده می‌شود و به دلیل عدم شکل‌گیری ترک‌های جدید یا پیشروی ترک‌های قبلی، روند کاهش سختی کندتر خواهد بود. در شکل زیر تغییرات سختی نمونه نسبت به سختی اولیه آزمایش بارگذاری مونوتونیک همان طرح اختلاط در سیکل‌های مختلف بارگذاری و در دامنه‌های متفاوت ارائه شده است.



شکل ۴: نمودار تغییرات سختی طی سیکل های متعدد بارگذاری

۲- مقاومت

با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ۵، هرچه تعداد سیکل های بارگذاری تحمل شده توسط عضو سازه ای بیشتر باشد، عضو موردنظر افت بیشتری را در مقاومت نهایی خود تجربه خواهد کرد. در صورت اعمال بارگذاری با سطح دامنه تغییرمکانی زیاد و ورود عضو به ناحیه پلاستیک مقدار این افت قابل ملاحظه می باشد در غیر اینصورت افت محسوسی در اعضاء بتنی مشاهده نخواهد شد. تغییرات مقاومت نهایی عضو در سیکل های مختلف بارگذاری نسبت به مقاومت تسلیم نمونه آزمایش شده تحت بارگذاری یکطرفه برای طرح اختلاط های مختلف با دامنه های بارگذاری متفاوت در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵: نمودار تغییرات مقاومت طی سیکل های مختلف بارگذاری

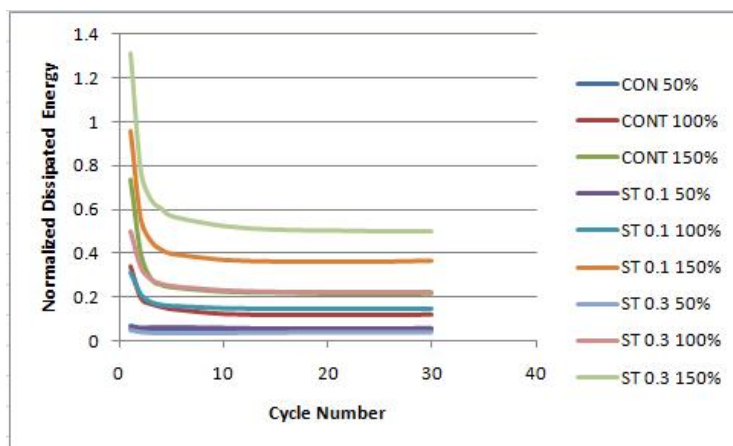
۳- انرژی مستهلک شده

قابلیت یک سازه برای اتلاف انرژی به طور مناسب یک جنبه مهم در کارایی سازه تحت بارگذاری سیکلی می باشد. انرژی تلف شده بیشتر نشان از عملکرد بهتر آن عضو دارد. انرژی استهلاک یافته توسط اعضاء از طریق محاسبه مساحت داخل حلقه های هیستریزس بدست می آید. یکی از روش های بیان توانایی استهلاک انرژی توسط اعضاء، نمایش آن بوسیله انرژی استهلاک یافته نرمال شده می باشد. از این پارامتر در محاسبه اندیس خرابی در اعضای سازه ای نیز استفاده می شود و فرمول آن به صورت زیر خواهد بود.

$$E_H^N = \frac{E_H}{F_y \Delta y} \quad (1)$$

تغییرات انرژی استهلاک یافته نرمال شده برای طرح اختلاط و دامنه های مختلف بارگذاری در طول سیکل های متفاوت در شکل ۶ نمایش داده شده است.

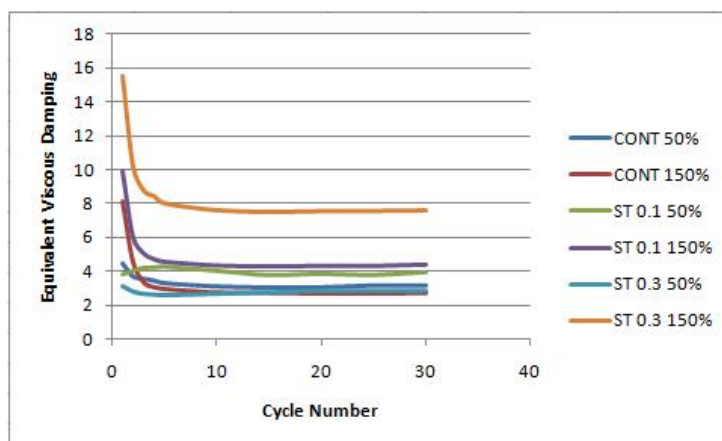




شکل ۶: تغییرات انرژی استهلاک یافته نرمال شده

۴- میرایی

میرایی ویسکوز یکی از فاکتورها جهت تشریح ظرفیت اعضای سازه ای در اتلاف انرژی زمین لرزه می باشد. برای یک سازه مکانیزم های میرایی را می توان توسط یک نسبت میرایی ویسکوز بیان کرد. مقادیر میرایی ویسکوز برای طرح اختلاط و دامنه های متفاوت و در سیکل های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نمودار، در دامنه های بارگذاری بیشتر از تغییرمکان تسلیم عضو، در سیکل های ابتدایی مقادیر میرایی بالا بوده و هرچه تعداد سیکل ها افزایش پیدا می کند از مقدار آن کاسته خواهد شد در حالیکه در بارگذاری های با دامنه، اعضای سازه ای رفتار غیرخطی از خود بروز نداده در نتیجه مقدار میرایی حاصل نیز ناچیز خواهد بود و این مقدار نیز طی سیکل های متعدد تغییر چشمگیری نخواهد داشت.



شکل ۷. نمودار تغییرات میرایی طی سیکل های مختلف بارگذاری

نتیجه گیری

- * در صورت تحمل یک بارگذاری سیکلی با دامنه کوچک و در محدوده رفتار خطی توسط عضو سازه ای، تغییرات محسوسی در مقدار سختی عضو مشاهده نخواهد شد در حالیکه با افزایش دامنه بارگذاری افت سختی چشمگیر بوده و با افزایش تعداد سیکل ها از میزان سختی نیز کاسته خواهد شد.
- * تغییرات مقاومت نیز همانند پارامتر سختی بوده و افت این پارامتر نیز به تعداد سیکل های بارگذاری و دامنه سیکل ها وابسته می باشد.
- * با افزایش دامنه بارگذاری، عضو به ناحیه پلاستیک ورود پیدا کرده و رفتار غیرخطی از خود بروز می دهد که این رفتار غیر خطی سبب افزایش مساحت حلقه های هیستریزس و انرژی استهلاک یافته توسط عضو خواهد شد.
- * مقادیر میرایی در محدوده رفتار الاستیک اعضای سازه ای ناچیز بوده و با بروز رفتار غیرخطی در مصالح، مقدار میرایی معادل ویسکوز نیز افزایش می یابد.

مراجع

ملاحی (۱۳۸۴) بررسی تجربی مشخصات مکانیکی بتن خود تحکیم و رفتار خمشی تیر های بتن آرمه ساخته شده از SCC، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

Daniel L and Loukili A (2002) Behaviour of high-strength fiber-reinforced concrete beams under cyclic loading, *ACI Structural Journal*, 99(3): 248-256

Filiatrault A, Pineau S and Houde J (1995) Seismic behaviour of steel-fiber reinforced concrete interior beam-column joints, *ACI Structural journal*, 92(5): 543-552

Kimura H, Ishikawa Y, Kambayashi A and Takatsu H (2007) Seismic behaviour of 200 MPa Ultra-High-Strength steel-fiber reinforced concrete columns under varying axial load, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(2): 193-200

Skarendahl A and Petersson O (2000) Self compacting concrete, state of the art report of RILEM technical committee 174, RILEM Report No 23