

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد تیرهای بتن آرمه خودتراکم حاوی الیاف تحت بارگذاری سیکلی شبه استاتیکی

حمیدرضا توکلی

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

پدرام 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

چکیده

آزمایشات آزمایشگاهی المان‌های سازه‌ای بتن مسلح برای تعیین رفتار آن‌ها تحت بارگذاری یک زلزله شبیه‌سازی شده از اهمیت بالایی برخوردار است. پارامترهایی همچون سختی، مقاومت، شکل‌پذیری، توانایی جذب و اتلاف انرژی و خرابی‌های بوجود آمده در اثر بارگذاری سیکلی، از جنبه‌های مورد نظر رفتار، در طراحی لرزه‌ای اعضای سازه‌ای می‌باشد که نمی‌توانند با اطمینان کامل توسط روش‌های تحلیلی تعیین گردند و نیاز است تا به وسیله آزمایشات آزمایشگاهی ارزیابی گردند. روش‌های متفاوتی جهت شبیه‌سازی زلزله شدید همانند روش میز لرزه، روش شبه‌دینامیکی و روش شبه‌استاتیکی وجود دارد که از مزایای روش‌های شبه‌استاتیکی می‌توان به سرعت پایین آزمایش و امکان مشاهده جزئیات در حین آزمایش و اقتصادی بودن آن اشاره کرد. بدین منظور نمونه تیرهای بتنی از ۴ طرح اختلاط شامل بتن‌های حاوی الیاف فلزی (۰.۱، ۰.۲، ۰.۳ درصد حجمی) و بتن فاقد الیاف به عنوان بتن مرجع مورد آزمایش و مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که هرچه میزان الیاف در بتن افزایش می‌یابد، سختی عضو در ناحیه خطی کمتر شده و همچنین المان‌سازه‌ای، نرمی و شکل‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهد. حضور الیاف مقاومت عضو را به مقدار قابل توجهی افزایش داده و در طی سیکل‌های بارگذاری نیز توانایی استهلاک انرژی را به طور مشهود بالا خواهد برد.

مقدمه

مواد سیمانی با مقاومت کششی پایین و ظرفیت کرنشی کم شناخته می‌شوند که موادی شکننده می‌باشند. به طور متداول از میلگردهای فولادی سرتاسری و دور پیچ در بتن برای تحمل تنشهای کششی و برشی وارد شده، استفاده می‌شود که استفاده از آن را به عنوان مواد سازه‌ای امکان‌پذیر می‌کند. در پنج دهه گذشته، نوع دیگری از تقویت‌کننده‌ها برای غلبه بر شکنندگی با نام الیاف گسسته با توزیع تصادفی استفاده شده است که نوع جدیدی از مصالح سازه‌ای به نام بتن مسلح الیافی را تولید کرده که در آن مقاومت، شکل‌پذیری و دوام تقویت شده است. عبارت بتن مسلح به الیاف^۱ به عنوان بتنی که ساخته شده از سیمان هیدرولیک (سیمانی که در آب سفت می‌شود)، سنگدانه‌های ریز و درشت و رشته‌های گسسته الیاف می‌باشد، شناخته می‌شود (ACI Committee, 1997).

انهدام و زوال بتن به شدت به تشکیل ریزترک‌ها و ترک‌ها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است. تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریز ترک‌ها می‌شوند و چنین ریز ترک‌هایی در ماتریس‌های مجاور سطح دانه‌های درشت متمرکز می‌شوند. با تأثیر بیشتر بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریز ترک‌ها در جسم بتن منتشر می‌شود (Soroushian, 1986). استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی بعنوان گامی موثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن معمولی محسوب می‌شود (Lin, 1992).

1- Fiber Reinforced Concrete (FRC)



یکی از شکل‌های مهم که باید برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه ایجاد شود، حلقه‌های هیستریزیس^۱ بار تغییر مکان است. در خلال زمین لرزه‌های قدرتمند انتظار می‌رود سازه وارد محدوده الاستوپلاستیک شده و حلقه‌های هیستریزیس می‌تواند درک خوبی برای تجزیه و تحلیل پاسخ الاستوپلاستیک لرزه‌ای ارائه کند (Weichen et al., 2008). پاسخ هیستریزیس نیرو-جابجایی، ظرفیت اتلاف انرژی سازه را با در نظر گرفتن مساحت محدود به حلقه‌های هیستریزیس نشان می‌دهد.


انرژی وارد شده به سازه دو فرم دارد: انرژی تلف شده و انرژی قابل بازیابی. کل انرژی جذب شده توسط سیستم برابر مجموع انرژی تلف-شده و انرژی قابل بازیابی است (Abdelsamine and Tom, 2010). انرژی تلف شده در یک چرخه مساحت محصور توسط حلقه هیستریزیس متناظر با منحنی بار-تغییر مکان تیر است و بیانگر ظرفیت عضو سازه‌ای در فرونشاندن اثرات زمین‌لرزه از طریق رفتار غیر الاستیک در فولادهای تقویت-کننده می‌باشد که باعث ترک‌خوردگی‌های مفرط و تغییر شکل‌های دائمی می‌شود. در بتن آرمه الیافی، الیاف داخل بتن نیز به دلیل رفتار غیر الاستیک الیاف به عنوان تلف‌کننده انرژی عمل می‌کند. رفتار غیر الاستیک الیاف مانند تغییر شکل، لغزش، گسیختگی یا بیرون کشیدگی الیاف به همراه فاکتورهای اصلی از جمله رفتار غیر الاستیک میلگردهای فولادی و ترک‌خوردگی بتن، بخش اعظمی از انرژی وارد شده به سازه در خلال تحریک لرزه‌ای را تلف می‌کنند (Daniel and Loukili, 2002).

روش کار آزمایشگاهی

۱- مصالح مصرفی

در ساخت نمونه‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند از فوق روان‌کننده^۲ نسل سوم بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر استفاده شده است. این ماده در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد دارای وزن مخصوصی برابر با ۱.۰۱ 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 | 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 دانه بندی 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 تشکیل دهنده 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).

1 - Hysteresis Loop
2 - Super Plasticizer



جدول ۲: طرح اختلاط بتن (kg/m^3)

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

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 ۲ 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

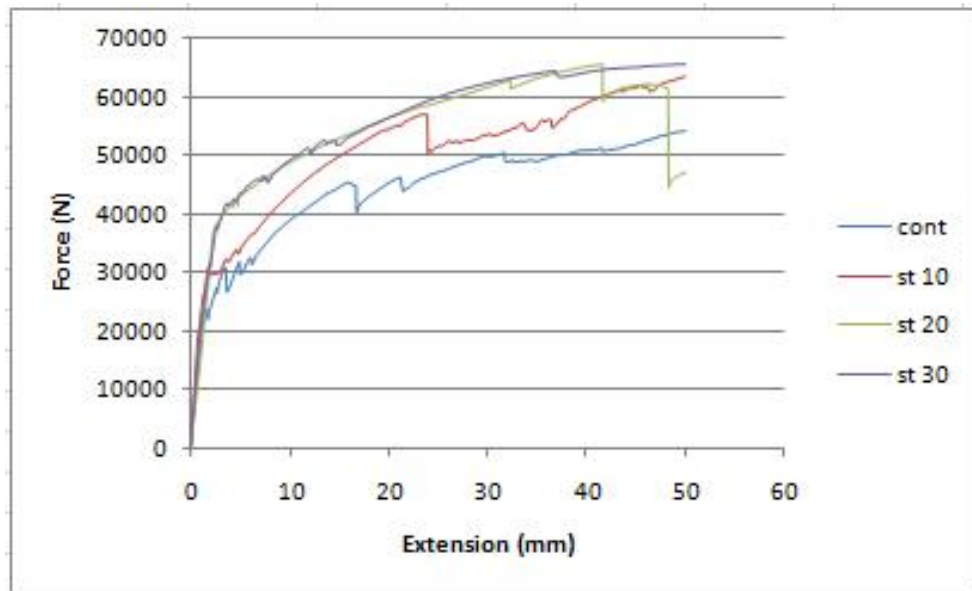
بارگذاری بر روی نمونه ها در حالت سیکلی با استفاده از یک نوع الگوی بارگذاری و در حالت بارگذاری بصورت کنترل تغییر مکان انجام شده است. الگوی بارگذاری اعمال شده به نمونه ها شامل ۳۰ سیکل بوده که در حالت تغییر مکان کنترل شامل دامنه ۱۵۰٪ تغییر مکان تسلیم بوده (این بارگذاری با دامنه ای در محدوده رفتار غیرخطی 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. مقادیر دامنه بارگذاری مربوط به الگوهای اعمالی به نمونه ها بدست آمده از منحنی رفتار یکطرفه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر دامنه های بارگذاری

| طرح اختلاط | تغییر مکان تسلیم (mm) | دامنه بارگذاری (mm) | |
|------------|-----------------------|---------------------|-------|
| cont | 1.45 | 150% y | 2.175 |
| St 10 | 1.85 | 150% y | 2.775 |
| St 20 | 2.3 | 150% y | 3.45 |
| St 30 | 2.6 | 150% y | 3.9 |

1 - Monotonic
2 - Cyclic

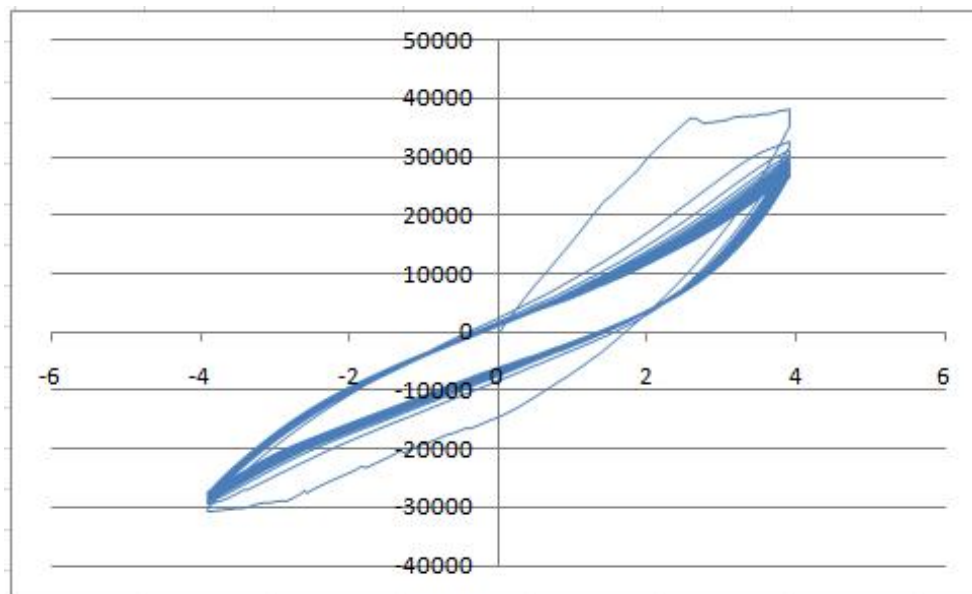




شکل ۲: نتایج آزمایش بارگذاری یکطرفه

بررسی نتایج

نتایج بارگذاری نمونه ST30 با دامنه ۱۵۰٪ تغییر مکان تسلیم در حالت کنترل تغییر مکان به عنوان نمونه در شکل ۳ ارائه شده است.

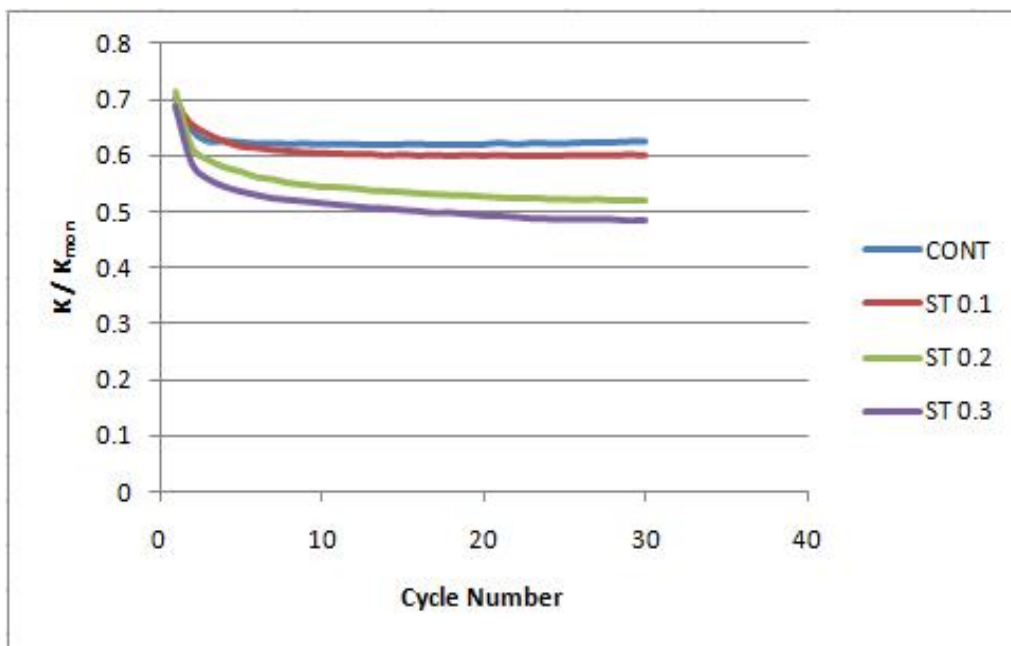


شکل ۳: حلقه های هیستریزیس نمونه آزمایش شده

پارامترهای ذکر شده در این بخش از مقایسه منحنی رفتاری سیکلی نمونه ها بعد از تجربه بارهای سیکلی، مورد مطالعه قرار گرفته اند.

۱- سختی

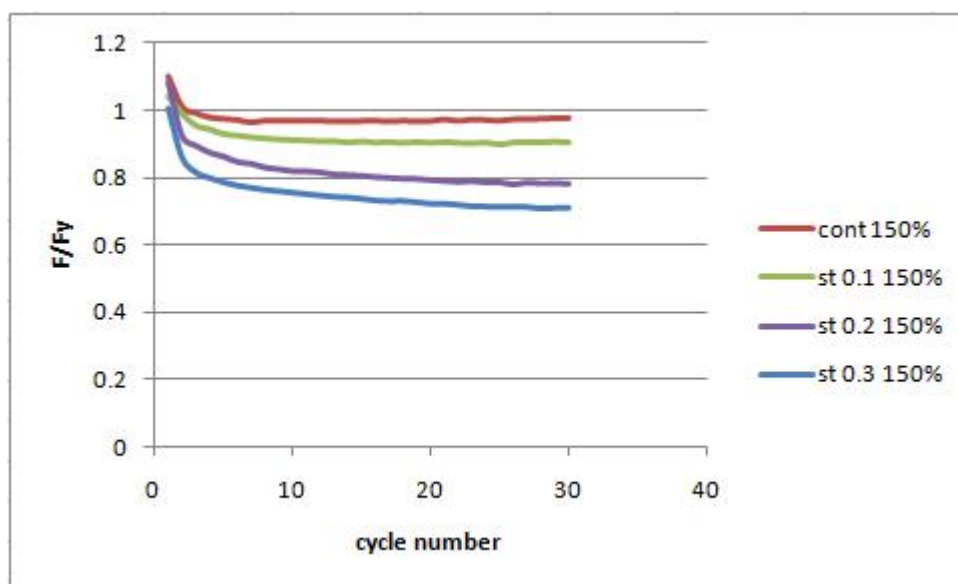
نتایج ارائه شده در شکل ۴ نشان می دهد که با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری مقدار انرژی تجمعی ورودی به عضو بیشتر شده و در نتیجه سختی عضو کاهش می یابد. نرخ کاهش سختی عضو در سیکل های اولیه بارگذاری بیشتر بوده که دلیل آن ایجاد ترک های اصلی در سیکل های اولیه بارگذاری می باشد در حالیکه در تعداد سیکل های بالاتر، تغییر شکل اعمال شده در عضو تنها باعث باز و بسته شدن ترک های ایجاد شده می شود و به دلیل عدم شکل گیری ترک های جدید یا پیشروی ترک های قبلی، روند کاهش سختی کندتر خواهد بود. در شکل زیر تغییرات سختی عضو نسبت به سختی اولیه آزمایش بارگذاری مونوتونیک همان طرح اختلاط در سیکل های مختلف بارگذاری ارائه شده است.



شکل ۴: نمودار تغییرات سختی در سیکل‌های مختلف 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. تغییرات مقاومت نهایی عضو در سیکل های مختلف بارگذاری نسبت به مقاومت تسلیم نمونه آزمایش شده تحت بارگذاری یکطرفه در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵: نمودار تغییرات مقاومت در سیکل های مختلف بارگذاری

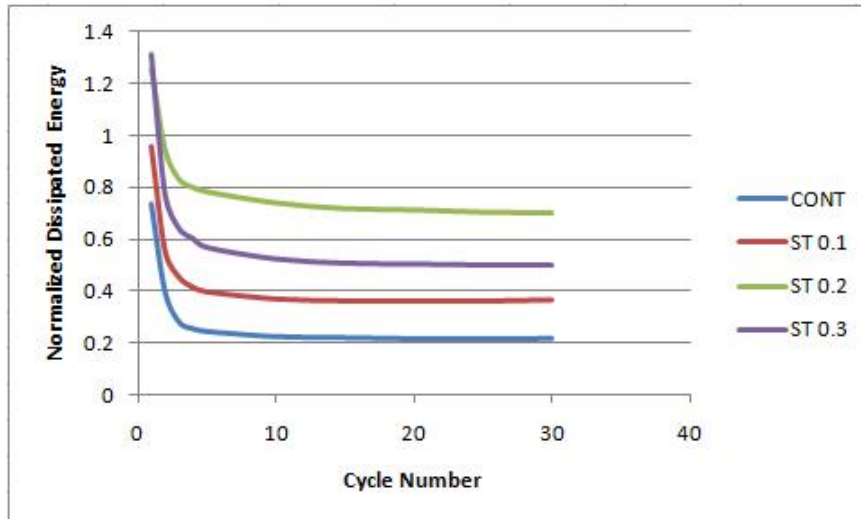
۳- انرژی مستهلک شده

توانایی استهلاک انرژی ورودی به سازه در بارگذاری های چرخه ای از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. 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.



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

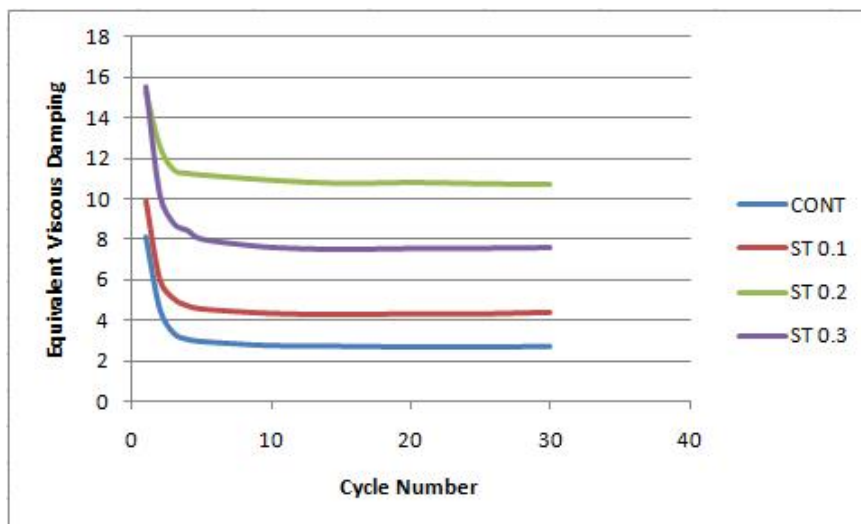
تغییرات انرژی استهلاک یافته نرمال شده برای طرح اختلاط های متفاوت در طول سیکل های متفاوت بارگذاری در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶: نمودار تغییرات انرژی مستهلاک شده نرمال در سیکل های مختلف

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 های متفاوت و در سیکل های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نمودار، در سیکل های ابتدایی مقادیر میرایی بالا بوده و هرچه تعداد سیکل ها افزایش پیدا می کند از مقدار آن کاسته خواهد شد.



شکل ۷: نمودار تغییرات میرایی در سیکل های مختلف بارگذاری

نتیجه گیری

* با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری در حالت کنترل تغییرمکان و با دامنه ثابت، نرخ افت پارامتر سختی کاهش یافته و ترک های جدید در اجزاء شکل نخواهد گرفت.

* کاهش سختی و مقاومت در این نوع بارگذاری به علت پدیده خستگی کم سیکل¹ بوده که در اثر بارگذاری های سیکلی با تعداد سیکل های کم و دامنه تغییرمکانی بارگذاری بالاتر از تغییرمکان تسلیم ، به عضو وارد می شود.

* با افزایش مقدار الیاف در بتن، توانایی جذب و استهلاک انرژی در اعضای بتنی افزایش می یابد که یکی از مزایای بسیار مهم استفاده از الیاف در بتن های معمولی برای بهبود رفتار لرزه ای آن ها می باشد.

* یکی از مکانیزم های ایجاد میرایی در اعضای بتنی ایجاد ترک در مقطع می باشد. به همین دلیل در سیکل های ابتدایی مقادیر میرایی بیشتر بوده و با گذشت زمان و تحمل تعداد سیکل های بیشتر با دامنه ثابت ، از مقدار میرایی کاسته خواهد شد.

مراجع

Abdelsamine S and Tom B (2010) Hysteresis energy and damping capacity of flexural elements constructed with different concrete strengths, *Engineering Structures*, 32, pp 297-305

ACI Committee 544 (1997) State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI544.1R-96, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan

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

LinWL (1992) Toughness behaviour of fiber reinforced concrete, *Fiber Reinforced Cement and Concrete*, Proceedings of the Fourth RILEM International symposium, Sheffield, UK, pp 299-315

Soroushian P (1986) Secondary reinforcement adding cellulose fibers, *ACI, Concrete International*, pp 28-38

Weichen X, Liang L, Bin C and Jie L (2008) The reversed cyclic load tests of normal and pre-stressed concrete beams, *Engineering Structures*, Vol. 30, pp 1014-1023

