

بررسی رفتار پیچشی بتن خودتراکم الیافی تحت بارهای سیکلی

مهدی خداداد سریزدی^{1*}، حامد ربیعی^۲، رضا مرشد^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

خصوصیات بتن خودتراکم الیافی تازه و سخت شده مورد توجه محققین در صنعت ساخت و ساز می باشد ولیکن، رفتار این بتن تحت اثر پیچش متناوب، ناشی از اعمال بارهای سیکلی کمتر مورد بررسی محققان قرار گرفته است. در این پژوهش آزمایشگاهی رفتار بتن خودتراکم الیافی تحت اثر پیچش سیکلی مطالعه شد. جهت اعمال پیچش، نمونه های T شکل ساخته شد که به صورت وارونه در دو انتهای قسمت افقی به صورت گیردار روی تکیه گاه متصل به کف صلب قرار گرفت و توسط دستگاه اکچوییتور نیروی رفت و برگشتی با دامنه های متفاوت به انتهای قسمت عمودی وارد شد تا قسمت افقی حول محور طولی اش تحت پیچش قرار گیرد. قسمت عمودی نمونه حاوی بتن بدون الیاف توسط میلگردهای طولی و عرضی مسلح شد به طوری که، در زمان اعمال بار جاری نشوند و از طریق آن پیچش به قسمت افقی ساخته شده با بتن خودتراکم الیافی وارد شود. با نیروی اعمال شده و ترسیم نمودارهای هیسترسیس، میزان تحمل لنگر پیچشی و اتلاف انرژی مورد بررسی قرار گرفت. از بتن خودتراکم رده C50 و الیاف فولادی با انتهای قلاب دار و نسبت طول به قطر ۶۲/۵ به میزان صفر (بتن شاهد)، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد حجم بتن استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده میزان ۰/۵ درصد الیاف در تمامی آزمایش ها دارای بیشترین میزان اتلاف انرژی تا ۳/۸۷ و بیشترین لنگر پیچشی تا ۲/۴۶ برابر نمونه شاهد داشته است.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم الیافی، رفتار پیچشی، بارهای متناوب، نمودار هیسترسیس

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2017.91893.1277		دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi:	10.22065/JSCE.2017.91893.1277	۱۳۹۶/۰۵/۱۹	۱۳۹۶/۰۸/۲۰	۱۳۹۶/۰۸/۲۹	۱۳۹۶/۰۸/۲۹	۱۳۹۸/۰۴/۰۱
		*نویسنده مسئول:				مهدی خداداد سریزدی
		پست الکترونیکی:				mkhodadad@yazd.ac.ir

Investigating Torsional Behavior of Fiber Reinforced Self Consolidating Concrete under Cyclic Loading

Mehdi Khodadad Saryazdi^{1*}, Hamed Rabiei², Reza Morshed³

1-Assistant professor, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2-MS.c. in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

3-Assistant professor, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

ABSTRACT

Researchers in the construction industry have shown great interest in rheological and mechanical properties as well as durability of fiber reinforced self-compacting concrete (FRSCC), however, its behavior under torsional cyclic loading, has rarely been studied. In the present experimental research, behavior of fiber reinforced self-compacting concrete under cyclic torsional loading was studied. T-shaped samples consisting of a horizontal beam made of FRSCC and a vertical shaft were made. Horizontal beam was fixed at both ends to a rigid base and cyclic loading was applied to the end of the vertical shaft causing a cyclic torque around the horizontal axis of the beam. The vertical shaft was reinforced by longitudinal and transverse bars so that it could not collapse at the time of loading. By plotting the hysteresis diagrams, the torsional strength and energy dissipation of each sample specimen were investigated. Self-compacting concrete C50 class and Hooked End Steel Fibers with length to diameter ratio of 62.5 and different amount of 0, 0.25, 0.5 and 0.75 percent by volume were used. Results showed that the mixture containing 0.5% fibers had the highest energy dissipation of 3.87 times that of control mix with no fibers, and maximum torsional strength of 2.46 times that of control mix.

ARTICLE INFO

Received: 10/08/2017

Revised: 11/11/2017

Accepted: 20/11/2017

Keywords:

Self Compacting Concrete,
Steel Fibers,
Torsional behavior,
Cyclic loads,
Hysteresis diagrams

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.91893.1277

*Corresponding author: Mehdi Khodadad Saryazdi

Email address: mkhodadad@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

بیش از سه دهه از به کارگیری بتن‌های توانمند می‌گذرد. در این مدت انواع بتن توانمند برای اهداف خاصی که عملکرد بالا مورد نیاز آن است، توسعه یافته‌اند. از جمله می‌توان به بتن خودتراکم و الیافی که معمولاً دارای مقاومت بالا نیز هستند اشاره نمود. ترد بودن بتن باعث شکست‌های ناگهانی و فاجعه باری در سازه‌های در معرض زلزله، انفجار و یا بارهای ناگهانی می‌شود. به همین علت و در بسیاری از موارد، طراحان مایل‌اند این رفتار به صورت شکست نرم‌تر اصلاح شود. بتن حتی در موقعیت بدون تنش دارای ترک‌های ریز ناشی از عواملی چون جمع شدگی می‌باشد. تحت تنش‌های کششی اعمالی نه تنها این ترک‌ها باز و گسترده می‌شوند بلکه تعداد زیادی ترک مویی در ناحیه انتقالی و خمیر شروع به رشد می‌کنند. تجمع این ترک‌ها در یک ناحیه باعث شکست بتن می‌شود. نقش الیاف جلوگیری از طولیل شدن ترک‌ها و اتصال آن‌ها به یکدیگر است. وجود الیاف مناسب در مسیر باعث دوخته شدن انتهای ترک می‌شود [۱]. این الیاف می‌توانند از جنس فولاد، شیشه، پلیمر و غیره باشند. مهمترین مشخصه بتن الیافی خاصیت جذب انرژی، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ضربه است. متراکم کردن بتن و جای دادن آن در گوشه و کنار قالب برای ساخت سازه‌های بتنی مقاوم و بادوام از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در اواخر دهه ۱۹۸۰ و پس از معرفی بتن توانمند، بتن خودتراکم به صنعت ساخت و ساز معرفی شد و با گذشت چند سال در بسیاری از سازه‌های بتنی زیربنایی مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیت پرکنندگی بدون صرف انرژی، عبور از موانع و عدم جداسدگی از مشخصات بارز این بتن می‌باشد. به کارگیری موفقیت آمیز الیاف در این بتن و دستیابی به این خصوصیات امری چالشی محسوب شده، آمیزشی از علم و هنر را می‌طلبد. در سال‌های اخیر خصوصیات بتن خودتراکم الیافی تازه و سخت شده مورد توجه محققین در صنعت ساخت و ساز قرار گرفته است. در این مقاله دست آوردهای پژوهش آزمایشگاهی رفتار بتن خودتراکم الیافی تحت اثر پیچش سیکلی، که کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، ارائه خواهد شد.

رفتار هیسترسیس، بیان کننده رابطه بار-تغییر مکان سازه تحت بارگذاری متناوب می‌باشد و یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد لرزه‌یابی سازه است. در خلال زمین لرزه‌های قوی انتظار می‌رود سازه وارد محدوده کشسان-خمیری شود و نمودار حلقه‌های هیسترسیس می‌تواند درک خوبی را برای تجزیه و تحلیل پاسخ لرزه‌ای کشسان-خمیری ارائه کنند. مساحت محدود به حلقه‌های هیسترسیس، ظرفیت اتلاف انرژی سازه را نشان می‌دهد. ماده شکننده‌ای مانند بتن، ظرفیت بار کششی خود را تقریباً بلافاصله پس از اولین ترک‌ها از دست می‌دهد. هنگامی که خمیر شکننده حاوی الیاف تحت بارگذاری خمش قرار می‌گیرد، ترک‌ها توسط الیاف پل زده می‌شوند [۲].

تنش بر اثر بارگذاری لرزه‌یابی در عضو سازه‌یابی بدون تقویت کافی، ممکن است منجر به یک پاسخ شکننده شود. اگر به هر صورتی کاهش شکنندگی میسر شود، رفتار شکست غیر خطی به نمایش گذاشته می‌شود، تا زمانی که کرنش در نقطه‌ای مشخص غالب شود. پس از این مرحله، مقاومت پسماند کافی نیاز است تا اطمینان حاصل شود که سازه می‌تواند در شرایط بارگذاری بعدی شامل تغییر شکل‌های بزرگ، که ممکن است نتیجه یک زمین لرزه باشند، ایستادگی کند. یک پارامتر مهم در عملکرد سازه تحت بارگذاری سیکلی، توانایی سازه در اتلاف انرژی است. ظرفیت اتلاف انرژی به عنوان یک معیار توانایی عضو سازه‌یابی برای تحمل بارگذاری سیکلی غیرخطی استفاده شده است [۳].

لازم به ذکر است که انرژی سیستم ارتعاشی با سازوکارهای مختلف تلف می‌شود و احتمال وقوع بیش از یک سازوکار در یک زمان وجود دارد. در ارتعاش یک ساختمان بتن‌آرمه، سازوکارهای اتلاف انرژی می‌توانند شامل: ترک خوردگی، جاری شدن تسلیح‌ها و اصطکاک میان بتن و تسلیح کننده‌ها در خلال لغزش باشند. در بتن‌آرمه الیافی، اصطکاک میان الیاف و خمیر (ماتریس)، جاری شدن الیاف و شکستن یا بیرون کشیدن الیاف از ماتریس نیز از جمله سازوکارهای اضافی هستند [۴].

بیشتر الیاف تا رسیدن به مقاومت کششی نهایی خود، عمل پل زدن را انجام می‌دهند و در نهایت گسیخته می‌شوند. انرژی که در خلال یک زمین لرزه به سازه وارد می‌شود، باید از طریق ایمن تلف شود. قابلیت یک سازه برای اتلاف انرژی، البته به صورت مناسب، نقش مهمی در کارایی سازه تحت بارگذاری سیکلی دارد. انرژی تلف شده بیشتر، نشان از عملکرد بهتر آن عضو دارد. انرژی تلف شده نیز یکی از پارامترهای مرتبط جهت تحلیل عملکرد اعضای بتن‌آرمه تحت بارهای سیکلی است. 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. انرژی جذب شده کلی

مساحت زیر نمودار پوش است و انرژی تلف شده تجمعی از طریق جمع انرژی تلف شده در چرخه‌های پیاپی به دست می‌آید. انرژی تلف شده در هر سیکل با تعیین مساحت داخل حلقه هیستریسیس لنگر-دوران محاسبه می‌شود [۵].

۲- مروری بر تحقیقات

تحقیقات بسیاری روی خواص مکانیکی بتن‌های خودتراکم و بتن‌های الیافی به صورت مجزا و بتن خودتراکم الیافی مانند مقاومت خمشی و مقاومت کششی و مقاومت فشاری انجام شده است ولیکن روی خاصیت پیچش تحت بارهای ثابت و بارهای سیکلی این نوع بتن تحقیقات خاصی صورت نپذیرفته است.

نیلی^۱ و افروغ ثابت در سال ۲۰۱۰، تأثیر دوده سیلیس و الیاف فولادی بر مقاومت ضربه‌ای و خواص مکانیکی بتن را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف به ترتیب، ۱۹، ۶۲ و ۵۰ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. همچنین با اضافه کردن الیاف فولادی به نمونه‌های حاوی دوده سیلیس، مقاومت ضربه‌ای و شکل‌پذیری بتن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۶].

توکلی و همکاران در سال ۱۳۹۴ تأثیر استفاده از نانو سیلیس بر خصوصیات مکانیکی بتن‌های خودتراکم الیافی مانند چقرمگی، انرژی شکست و مقاومت خمشی با نگرش ویژه به جذب انرژی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که ذرات نانوسیلیس به دلیل داشتن فعالیت شدید پوزولانی و خاصیت پرکنندگی بسیار مناسب، به تقویت ناحیه تماس الیاف با ماتریس سیمان کمک شایانی می‌کنند. استفاده از درصد‌های مختلف الیاف فلزی، الیاف پلی‌پروپیلنی و الیاف شیشه‌ای انرژی شکست را نسبت به بتن شاهد به ترتیب حداکثر ۳۱، ۴/۵ و ۱/۵ درصد و چقرمگی را نسبت به بتن شاهد به ترتیب حداکثر ۳۰، ۵ و ۳ برابر افزایش می‌دهد [۷].

مظلوم و همکارش در سال ۲۰۱۵، با تحقیق بر روی تخمین ظرفیت پیچشی تیرهای ساخته شده از بتن خودتراکم ساخت دستگاهی برای ایجاد کوپل پیچشی ثابت، ظرفیت پیچشی تیر بتنی را محاسبه کرده و هم چنین تأثیر ۱۰ درصدی میکروسیلیس بر خاصیت پیچشی در نمونه‌هایی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ را نشان دادند [۸].

وانگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۶، رفتار لرزه‌ای بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی را تحت بارهای سیکلی پیچشی مورد بررسی قرار دادند. آنها حالت‌های شکست، حلقه‌های هیستریسیس و ظرفیت جذب انرژی تیرهای حاوی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی و سنگدانه‌های معمولی را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. وی و همکارانش با توجه به محدودیت‌های اجرایی، با ساخت دو نمونه از بتن با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی نشان دادند، ترک‌های پیچشی در هر دو حالت به صورت ترک‌های ماریچ هستند و گسترش ترک‌ها در هر دو حالت بسیار شبیه به یکدیگر بود. نمودار هیستریسیس و نقاط مهم و عطف آن‌ها بسیار شبیه به هم بوده ولی ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری بتن با سنگدانه بازیافتی نسبت به بتن با سنگدانه عادی به ترتیب ۲۰ و ۷ درصد بیشتر است [۹].

بولکبج^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶، با بررسی رفتار خمشی بتن حاوی الیاف فولادی تحت بارهای سیکلی، تأثیر هم زمان کارایی الیاف فولادی و مقاومت فشاری بر رفتار خمشی این بتن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گیری کردند که مقاومت خمشی در بهترین حالت به مقدار ۲۴۲ درصد نسبت به حالت مینا افزایش می‌یابد و در ضمن کارایی بتن نقش بسیار مهمی در جهت‌گیری و توزیع الیاف در نمونه‌ها ایفا می‌کند [۱۰].

۳- مواد و آزمایش‌ها

۳-۱- مواد و مصالح مورد استفاده

چگالی سیمان، دوده سیلیس، پودر سنگ و فوق‌روان کننده مورد استفاده در این آزمایش در جدول ۱ و چگالی، ظرفیت جذب آب و رطوبت شن و ماسه مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

¹ Nili

² Wang

³ Boulekbache

جدول ۱: مشخصات مصالح مورد استفاده

سیمان	دوده سیلیس	فوق روان کننده	پودر سنگ	شرکت تولید کننده
اردستان	سراپوش	سراپوش	یزد	
پرتلند تیپ ۲	۱۰ کیلویی	SPC N-2	۲۵ کیلویی	مدل
۳/۱۰	۲/۲	۱/۱	۲/۶۰	چگالی

جدول ۲: مشخصات فیزیکی شن و ماسه

مصالح	بزرگترین اندازه (mm)	جذب آب (درصد)	رطوبت موجود (درصد)	چگالی
شن	۱۲/۵	۱/۴	۰/۱	۲/۶۷
ماسه	۴/۷۵	۳/۱	۰/۲	۲/۶۳

شکل ظاهری الیاف فولادی استفاده شده در این تحقیق به صورت دوسر قلاب است (شکل ۱). مشخصات الیاف فولادی استفاده شده در نمونه‌ها طبق جدول ۳ می‌باشد. مخلوط کن مورد استفاده در ساخت بتن، از نوع تغاری بود. ابتدا الیاف و سنگدانه‌ها با یکدیگر مخلوط شدند، سپس سیمان، پودر سنگ و بخشی از آب مخلوط همراه با فوق روان کننده اضافه شد. دوده سیلیس در یک سطل جداگانه با بخشی از آب مخلوط شد و به صورت دوغاب به مخلوط کن اضافه شد. مخلوط کردن به مدت پنج دقیقه تا رسیدن به حالت همگن ادامه یافت.

جدول ۳: مشخصات الیاف به کار رفته

نسبت L/d	قطر الیاف (mm)	طول الیاف (cm)	وزن مخصوص (Kg/m ³)	ضریب ارتجاعی (GPa)
۶۲/۵	۰/۸	۵	۷۸۰۰	۲۰۰



شکل ۱: نمونه الیاف فولادی استفاده شده

۳-۱- طرح مخلوط بتن خودتراکم الیافی

بر اساس روش حجمی، یک مخلوط بتن خودتراکم بدون الیاف به عنوان بتن شاهد و سه مخلوط حاوی ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵ درصد حجمی الیاف طراحی و ساخته شد. طرح مخلوط هر چهار بتن خودتراکم در جدول ۴ بیان شده است. برای ساخت هر نمونه و آزمایش‌های آن مقدار ۹۰ لیتر بتن تهیه شد.

جدول ۴: طرح مخلوط بتن‌های خودتراکم الیافی (Kg/m³)

نمونه	شناسه مخلوط	آب	سیمان	میکروسیلیس	پودر سنگ	فوق روان کننده	الیاف	ماسه	شن
بتن خودتراکم شاهد	(SCC-F0)	۱۶۶/۷	۵۵۳/۵	۶۹/۲	۶۹/۲	۱۰/۴	۰	۷۳۶/۴	۸۰/۱
بتن خودتراکم با ۰/۲۵ درصد الیاف	(SCC-F25)	۱۶۶/۷	۵۵۳/۵	۶۹/۲	۶۹/۲	۱۰/۴	۱۹/۶	۷۳۰/۵	۷۸۷/۳
بتن خودتراکم با ۰/۵۰ درصد الیاف	(SCC-F50)	۱۶۶/۷	۵۵۳/۵	۶۹/۲	۶۹/۲	۱۰/۴	۳۹/۲	۷۲۴/۶	۷۷۳/۶
بتن خودتراکم با ۰/۷۵ درصد الیاف	(SCC-F75)	۱۶۶/۷	۵۵۳/۵	۶۹/۲	۶۹/۲	۱۰/۴	۵۸/۹	۷۱۸/۷	۷۵۹/۸

۳-۲- ساخت نمونه‌ها و آزمایش پیچش

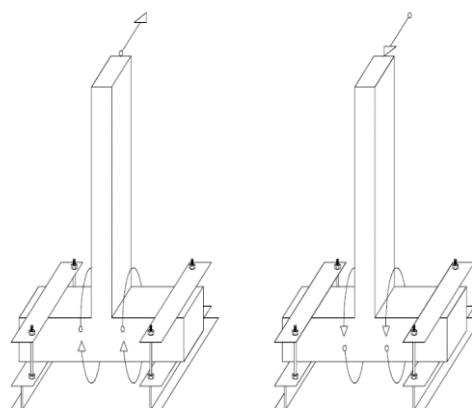
مطابق شکل‌های ۲ و ۳، نمونه T به صورت وارونه و به وسیله دو عدد نبشی و چهار بولت به صورت اتصال گیردار روی کف صلب نصب شده است. نیرو از طریق سر اکچوییتور به قسمت عمودی نمونه T وارد شده و این نیرو باعث ایجاد پیچش حول محور طولی تیر افقی دوسر گیردار می‌شود. فاصله محل اتصال دستگاه به قسمت قائم تا مرکز قسمت افقی که در حقیقت بازوی پیچش است برای تمامی نمونه‌ها برابر ۱۰۵ سانتی‌متر است. (شکل ۴) نتایج در ادامه برای یک نمونه تحت پیچش در هر آزمایش بیان شده است (لنگر هر نمونه نصف لنگر کل است). مطابق با شکل ۵ الگوی بارگذاری برای رفتار سیکلی بر اساس آیین‌نامه FEMA461 انتخاب شد [۱۱]. توسط نرم‌افزار اکچوییتور، برای هر یک از نمونه‌ها جابه‌جایی‌های $1 \pm$ ، $2 \pm$ ، $4 \pm$ ، $8 \pm$ ، $16 \pm$ ، $32 \pm$ و $64 \pm$ میلی‌متر در نظر گرفته شد و برای کاهش خطا در هر جابه‌جایی سه سیکل در نظر گرفته شد. نتایج نهایی از نمودارها برای هر جابه‌جایی به صورت میانگین سه سیکل محاسبه شده است. دستگاه اکچوییتور مورد آزمایش مربوط به شرکت زوییک/روال^۴ ساخت کشور آلمان است که دارای حداکثر نیروی ۱۰۰ کیلو نیوتن و حداکثر جابه‌جایی ۲۵۰ میلی‌متری است. محل ساخت و آزمایش نمونه‌ها در آزمایشگاه سازه و بتن دانشکده عمران دانشگاه یزد می‌باشد.



شکل ۴: بازوی پیچش

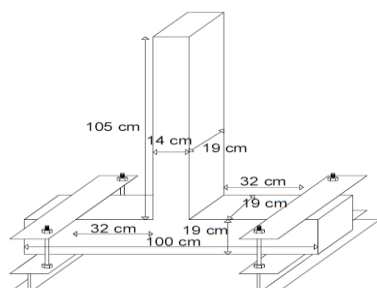


شکل ۳: اتصال نمونه به دستگاه و کف صلب

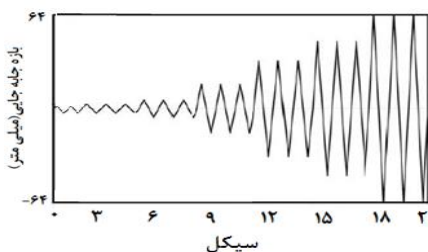


شکل ۲: شمای کلی از دستگاه و نحوه پیچش

با توجه به حداکثر بار مورد اعمال توسط دستگاه اکچوییتور و با در نظر گرفتن این نکته که قسمت متصل به دستگاه نباید تسلیم شود، محاسباتی برای نحوه مسلح کردن این قسمت صورت گرفت و مقدار آرماتور مورد نیاز برای این قسمت محاسبه شد. در این قسمت از شش میلگرد آجدار ۱۶ به عنوان میلگردهای طولی و خاموت‌هایی با میلگرد آجدار ۱۰ به فواصل ۷ سانتی‌متری استفاده شد. نمونه‌های ساخته شده به صورت T شکل هستند که در قسمت عمودی بتن مسلح و در قسمت افقی، بتن خودتراکم الیافی قرار دارد. ابعاد قسمت قائم ۱۴ در ۱۹ سانتی‌متر به طول ۱۰۵ سانتی‌متر و قسمت افقی ۱۹ در ۱۹ سانتی‌متر به طول ۱۰۰ سانتی‌متر است (شکل ۶).



شکل ۶: ابعاد و مشخصات نمونه T شکل

⁴ Zwick/Roell

آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر روی نمونه خودتراکم شاهد و سه نمونه بتن خودتراکم الیافی صورت پذیرفت و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. کلیه آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم براساس آیین نامه افنارک^۵ [۱۲] و آزمایش مقاومت فشاری بر اساس ASTM C39 انجام شد [۱۳]. با افزایش درصد الیاف فولادی کرائی بتن تازه کاهش یافته به طوریکه جریان اسلامپ بتن حاوی ۰/۷۵ درصد الیاف به ۵۴۰ میلیمتر کاهش یافت. به همین دلیل بتن با یک درصد الیاف ساخته نشد. نظر به اینکه رفتار بتن خودتراکم مورد بررسی قرار می‌گرفت از ویبره کردن بتن پرهیز شد.

جدول ۵: نتایج آزمایش‌های تازه و مقاومت فشاری نمونه‌های خودتراکم الیافی

نمونه	جریان اسلامپ (میلی‌متر)	آزمایش جعبه L	قیف V (ثانیه)	جعبه U (میلی‌متر)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
بتن خودتراکم شاهد	۷۶۰	۰/۹۴	۶/۹	۷	۵۰/۱
بتن خودتراکم با ۰/۲۵ درصد الیاف	۶۷۰	۰/۹۰	۸/۵	۱۱	۵۷/۲
بتن خودتراکم با ۰/۵۰ درصد الیاف	۶۲۰	۰/۸۶	۱۰/۶	۱۸	۶۳/۳
بتن خودتراکم با ۰/۷۵ درصد الیاف	۵۴۰	۰/۸۱	۱۱/۷	۳۱	۵۹/۷

۴- تحلیل و بررسی نتایج

۴-۱- تحلیل و محاسبه خطاها

وجود خطا در کارهای آزمایشگاهی می‌تواند ناشی از خطاهای انسانی، دستگاه و یا وسایل اندازه‌گیری باشد. در این تحقیق، دو خطا در جواب‌های به دست آمده وجود دارد. نتایج نهایی از تصحیح مجموع خطاها ارائه شده است.

الف: لقی دستگاه

در لحظه تغییر حالت دستگاه از فشار به کشش یک لقی کوچک در دستگاه وجود دارد که باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شود. تمامی مقادیر جابه‌جایی‌ها، به میزانی که این لقی از بین بروند جابه‌جا شده در نمودارها منتقل شده اند.

ب: تغییر مکان قاب پایه نگهدارنده دستگاه اکچوییتور

این تغییر مکان نیز عامل دیگری در ایجاد خطا در محاسبات و نتایج است. خطای قاب پایه اکچوییتور به ازای هر ۵۰ کیلونیوتن برابر ۲ میلی‌متر می‌باشد.

۴-۲- حالات شکست نمونه‌ها

با توجه به بررسی رفتار پیچشی نمونه‌ها، انتظار وجود ترک‌های پیچشی در نمونه‌ها می‌رود. ترک‌های پیچشی به صورت دوار و با زاویه ۴۵ درجه تشکیل می‌شوند که با توجه به شکل‌های ۷ تا ۹ می‌توان ترک‌های پیچشی با زاویه حدود ۴۵ درجه و به صورت پیوسته دورتا دور نمونه‌ها را در تمامی حالات مشاهده کرد. این حالت ترک خوردگی توسط وانگ و همکاران [۹] نیز گزارش شده است.

⁵ EFNARK



شکل ۸: حالت شکست پیچشی بتن با ۰/۵ درصد الیاف



شکل ۷: حالت شکست پیچشی بتن شاهد



شکل ۹: حالت شکست پیچشی بتن با ۰/۷۵ درصد الیاف

الیاف فولادی بعد از شکست نمونه، لنگرهای وارده را به روش پل زدن تا لحظه گسیختگی تحمل می‌نمایند. در شکل ۱۰ نمونه‌ایی از گسیختگی الیاف فولادی در اثر تحمل نیرو بعد از شکست نشان داده شده است.



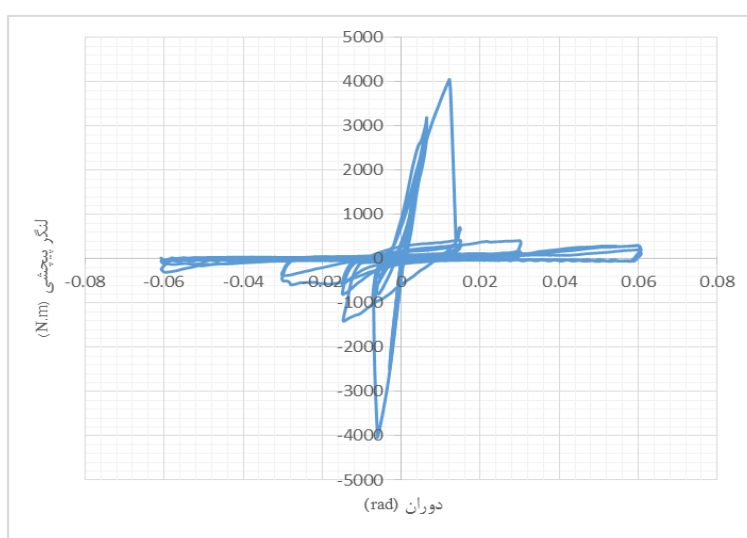
شکل ۱۰: گسیختگی الیاف فولادی در اثر اعمال نیرو بعد از شکست

۳-۴- ترسیم نمودارهای هیستریسیس لنگر-دوران با استفاده از نتایج نمودار نیرو-تغییر مکان

خروجی‌های نرم افزار اکچوییتور به صورت داده‌های نیرو-تغییر مکان است. با توجه به اهمیت پیچش و با در نظر گرفتن این موضوع که بازوی پیچش برابر ۱۰۵ سانتی‌متر است، در ابتدا نمودارهای نیرو-تغییر مکان تبدیل به نمودارهای لنگر-دوران شده و نتایج از نمودارهای لنگر-دوران استخراج شده است. با توجه به شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ مشاهده می‌شود در هر جابه‌جایی سه سیکل وجود دارد.

الف: بتن خودتراکم شاهد (SCC-F0)

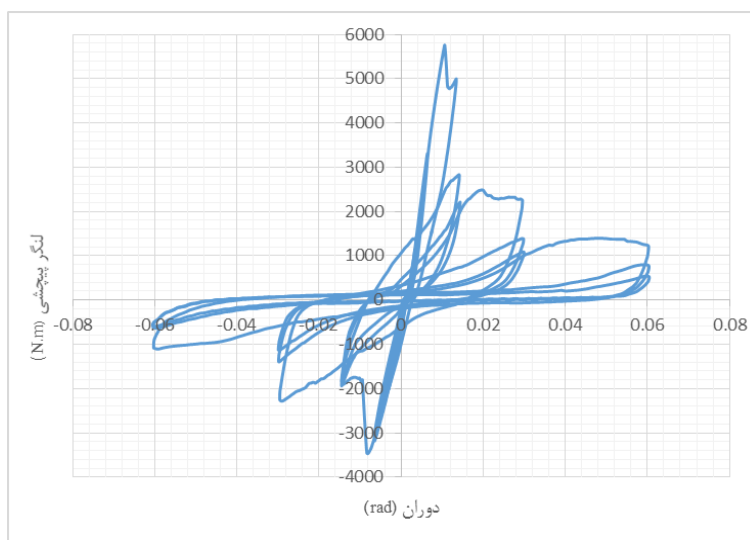
همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود نمونه در نقطه بیشینه مقدار لنگر $4054/89$ نیوتن متر را تحمل کرده است و بعد از شکست بلافاصله مقاومت خود را به صورت یکباره از دست می‌دهد. مقدار لنگر پیچشی در سیکل‌های بعد از شکست بسیار پایین و ناچیز است.



شکل ۱۱: نمودار لنگر-دوران بتن خودتراکم شاهد بدون الیاف (SCC-F0)

ب: بتن خودتراکم با ۰/۲۵ درصد الیاف (SCC-F25)

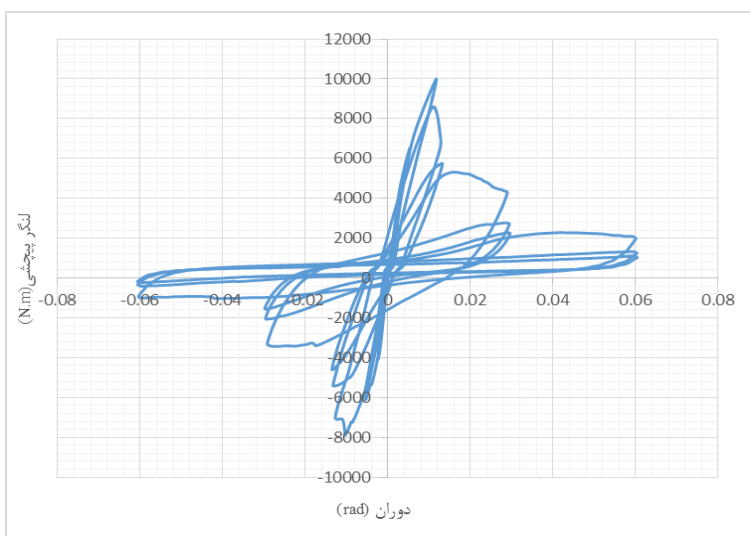
همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود لنگر بیشینه به نسبت نمونه شاهد افزایش داشته و لنگر پیچشی بیشینه $5755/02$ نیوتن متر است. بعد از شکست، مقدار لنگر پیچشی که توسط نمونه تحمل می‌شود کاهش یافته ولیکن به علت وجود الیاف فولادی و عمل پل‌زدن آن‌ها تا گسیختگی این سیر نزولی به یکباره نیست و مقدار لنگر پیچشی در سیکل‌های دوم و سوم بعد از شکست بیشتر از نمونه شاهد است.



شکل ۱۲: نمودار لنگر-دوران بتن خودتراکم حاوی ۰/۲۵ درصد الیاف (SCC-F25)

ج: بتن خودتراکم با ۰/۵ درصد الیاف (SCC-F50)

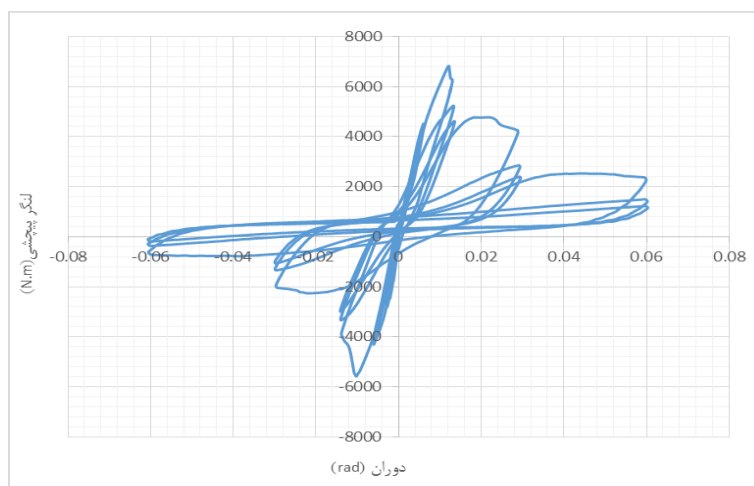
همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود لنگر بیشینه به نسبت نمونه شاهد و ۰/۲۵ درصد الیاف افزایش داشته و لنگر پیچشی بیشینه ۹۹۹۶/۶۳ نیوتن متر است. مقدار لنگر پیچشی بیشینه در سیکل‌های دوم و سوم بعد از شکست، باتوجه به وجود الیاف و بیشتر شدن مقدار آن‌ها به نسبت نمونه ۰/۲۵ درصد الیاف، از نمونه شاهد و نمونه ۰/۲۵ درصد الیاف بیشتر است.



شکل ۱۳: نمودار لنگر-دوران بتن خودتراکم حاوی ۰/۵۰ درصد الیاف (SCC-F50)

د: بتن خودتراکم با ۰/۷۵ درصد الیاف (SCC-F75)

در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود لنگر بیشینه به نسبت نمونه شاهد و نمونه ۰/۲۵ درصد الیاف افزایش داشته ولی نسبت به نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف کاهش داشته و مقدار آن برابر ۶۸۱۹/۱۴ نیوتن متر است. کاهش مقدار لنگر بیشینه به نسبت نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف می‌تواند بر اثر عدم تراکم کامل نمونه‌ها به دلیل افزایش درصد الیاف باشد.



شکل ۱۴: نمودار لنگر-دوران بتن خودتراکم حاوی ۰/۷۵ درصد الیاف (SCC-F75)

۴-۴- نتایج حاصل از نمودارهای هیستریسیس

با توجه به اینکه در سیکل‌های بعد از بیشینه مقاومت، افت مقاومت اتفاق می‌افتد مقادیر محاسبه شده برای نمونه شاهد تا ۸۵ درصد مقاومت بیشینه [۱۴] و برای بقیه نمونه‌ها تا سیکلی که کاهش مقاومت بسیار نبوده و الیاف در نمونه فعال بوده اند محاسبه شده است. برای محاسبه انرژی تلف‌شده، با توجه به اینکه برای یک جابه‌جایی سه سیکل وجود دارد، مساحت محصور میان نمودار رفت و برگشت هر سیکل محاسبه شد و میانگین سه مساحت محصور، به عنوان میزان انرژی تلف‌شده آن جابه‌جایی در نظر گرفته شد. با توجه به چهار نمودار لنگر-دوران نمونه‌ها، میزان لنگر بیشینه و اتلاف انرژی آن‌ها در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶: نتایج حاصل از نمودارهای هیستریسیس لنگر-دوران

نمونه	بیشینه دوران (rad)	بیشینه لنگر (نیوتن متر)	اتلاف انرژی کل (ژول)
بتن خودتراکم شاهد	۰/۱۱۸۵	۴۰۵۴/۸۹	۳۸/۰۸
بتن خودتراکم با ۰/۲۵ درصد الیاف	۰/۰۲۸۱۷	۵۷۵۵/۰۲	۷۶/۹۳
بتن خودتراکم با ۰/۵۰ درصد الیاف	۰/۰۲۸۷۷	۹۹۹۶/۶۳	۱۴۷/۴۷
بتن خودتراکم با ۰/۷۵ درصد الیاف	۰/۰۲۸۵۱	۶۸۱۹/۱۴	۹۹/۷۹

۴-۵- مقایسه حداکثر لنگر پیچشی

مقدار بیشینه لنگر پیچشی قابل تحمل هر نمونه و نسبت تغییرات آن به نسبت نمونه شاهد در جدول ۷ بیان شده است.

جدول ۷: میزان حداکثر لنگر پیچشی

نمونه	بیشینه لنگر پیچشی (N.m)	بیشینه لنگر پیچشی نسبت به بتن شاهد
بتن خودتراکم شاهد	۴۰۵۴/۸۹	۱
بتن خودتراکم با ۰/۲۵ درصد الیاف	۵۷۵۵/۰۲	۱/۴۲
بتن خودتراکم با ۰/۵۰ درصد الیاف	۹۹۹۶/۶۳	۲/۴۶
بتن خودتراکم با ۰/۷۵ درصد الیاف	۶۸۱۹/۱۴	۱/۶۸

مشاهده می‌شود که در بتن با ۰/۵ درصد الیاف مقدار لنگر پیچشی حداکثر ۲/۴۶ برابر نمونه شاهد افزایش داشته است. روند افزایشی لنگر بیشینه تا نمونه ۰/۵ درصد الیاف افزایش و سپس کاهش دارد.

۴-۵-۱- محاسبه ظرفیت پیچشی محاسباتی

ظرفیت پیچشی بر اساس رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$T_{Cr} = 2 \left(\frac{A_c}{P_c} \right)^2 v_c \quad (1)$$

که در آن T_{Cr} ، A_c ، P_c و v_c به ترتیب برابر با ظرفیت پیچشی، مساحت کل مقطع، محیط خارجی مقطع و مقاومت برشی بتن است.

$$T_{cr} = 4.85 \text{ KN.m}$$

ظرفیت پیچشی بتن شاهد برابر با ۴/۰۵ کیلونیوتن متر است که اختلاف بین ظرفیت پیچشی محاسباتی و ظرفیت پیچشی به دست آمده ۰/۸ کیلونیوتن متر و به میزان ۱۶ درصد است. این اختلاف می‌تواند ناشی از اعمال برش اندک اعمال شده توسط اکچوییتور به نمونه‌ها باشد.

۴-۶- مقایسه اتلاف انرژی کل

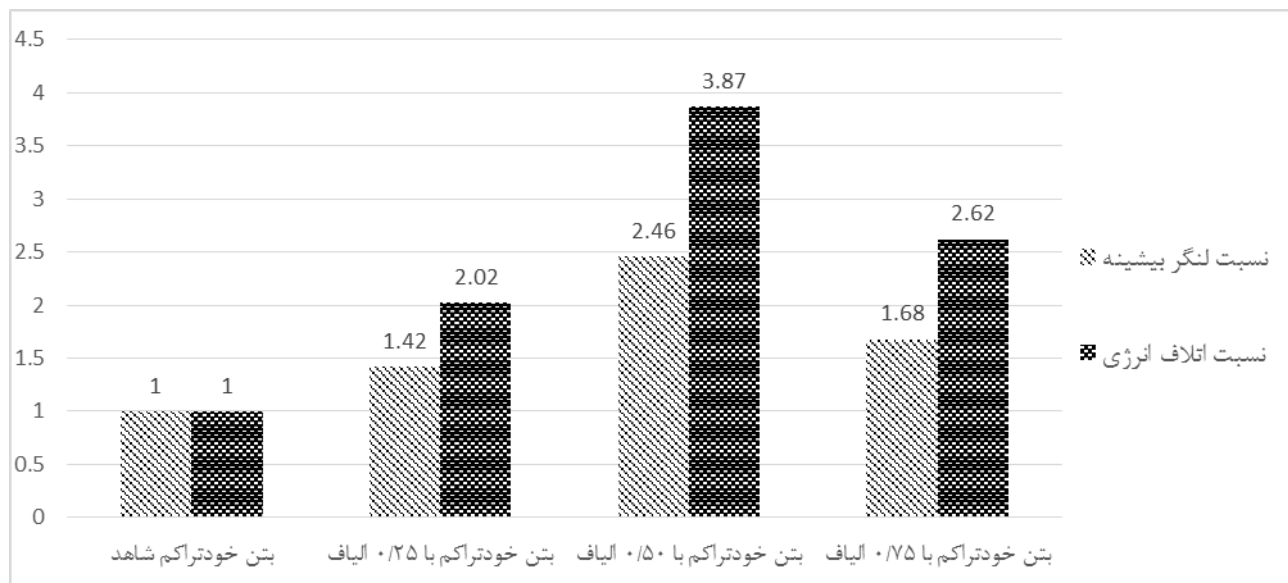
مقایسه میزان اتلاف انرژی هریک از نمونه‌ها که توسط مجموع تجمعی سطح محصور بین نمودار رفت و برگشت محاسبه شده است در جدول ۸ بیان شده است.

جدول ۸: مقایسه اتلاف انرژی کل

نمونه‌ها	اتلاف انرژی کل (ژول)	نسبت اتلاف انرژی کل به نسبت بتن شاهد
بتن خودتراکم شاهد	۳۸/۰۸	۱
بتن خودتراکم با ۰/۲۵ درصد الیاف	۷۶/۹۴	۲/۰۲
بتن خودتراکم با ۰/۵۰ درصد الیاف	۱۴۷/۴۷	۳/۸۷
بتن خودتراکم با ۰/۷۵ درصد الیاف	۹۹/۷۹	۲/۶۲

ملاحظه می‌شود که در بتن با ۰/۵ درصد الیاف میزان اتلاف انرژی کل ۳/۸۷ برابر نمونه شاهد افزایش داشته است. این افزایش تا نمونه ۰/۵ درصد الیاف ادامه داشته و بعد از آن کاهش می‌یابد.

مقایسه نسبت لنگر بیشینه و اتلاف انرژی بتن‌های خودتراکم الیافی به نسبت بتن خودتراکم شاهد به صورت مقایسه توامان در شکل ۱۵ ارائه شده است.



شکل ۱۵: مقایسه نسبت لنگر بیشینه و اتلاف انرژی به نسبت بتن خودتراکم شاهد

۵- نتیجه گیری

- با توجه به نتایج آزمایش‌ها، بر اساس مقاومت فشاری، اضافه کردن مقدار ۰/۵ درصد (حجمی) الیاف فولادی به بتن خودتراکم، بیشترین مقاومت فشاری را در نمونه‌ها ایجاد می‌کند.
- با توجه به نتایج بتن تازه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نتایج آزمایش پیچش، با افزایش مقدار درصد الیاف فولادی به بتن خودتراکم روانی و کارایی بتن همواره کاهش یافته ولی مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه و هم‌چنین لنگر پیچشی بیشینه همواره افزایش نیافته است. در بتن با ۰/۵ درصد الیاف فولادی این افزایش به حداکثر رسیده و بعد از آن کاهش می‌یابد.
- در منحنی هیسترسیس با افزایش مقدار الیاف تا ۰/۵ درصد مقادیر نیروی بیشینه افزایش یافته است و سپس کاهش می‌یابد و بیشترین نیروی در ۰/۵ درصد الیاف جذب شده است.
- برای تمامی نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته مقادیر انرژی تلف شده در خلال سیکل اول بالاتر از مقادیر در سیکل دوم و سوم در یک جابه‌جایی یکسان بوده است. که عمدتاً به دلیل افت در خصوصیات مکانیکی در سیکل دوم و سوم در جابه‌جایی یکسان بوده است.
- افزودن الیاف فولادی باعث رشد چشمگیری در انرژی تلف شده تجمعی نسبت به نمونه بتن شاهد شده است. این افزایش با افزایش تغییرمکان بیشتر شده و در سیکل‌های انتهایی برای نمونه با ۰/۵ درصد الیاف به ۳/۸۷ برابر نمونه شاهد (بدون الیاف) رسیده است.
- در منحنی هیسترسیس، رابطه میان بار و تغییرمکان برای تمامی نمونه‌های مورد آزمایش تا قبل از ترک خوردگی خطی بوده است. پس از ترک خوردگی، شیب منحنی هیسترسیس با افزایش تغییرمکان افت کرده است.
- از نتایج به دست آمده در این مطالعه مشاهده می‌شود که افزودن الیاف، حتی در مقادیر کم می‌تواند ظرفیت باربری و اتلاف انرژی نمونه‌های بتن‌آرمه را بهبود ببخشد.
- عملکرد ضعیف‌تر بتن حاوی ۰/۷۵ درصد الیاف در مقایسه با ۰/۵۰ درصد الیاف می‌تواند به دلیل وجود الیاف بیشتر و کاهش تراکم باتوجه به اینکه نمونه‌ها به دلیل خودتراکم بودن و ویرنه نشده اند باشد جریان اسلامپ این بتن به زیر ۵۵۰ میلیمتر رسید و تمام نمونه‌ها از جمله این نمونه بدون ویرنه کردن قالب‌گیری شدند. کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با ۰/۷۵ به نسبت بتن با ۰/۵ درصد الیاف نیز گویای پیوستگی و تراکم بهتر بتن خودتراکم با الیاف در مقدار ۰/۵ درصد الیاف فولادی است.

- علی‌رغم کاهش مقدار بیشینه لنگر پیچشی در لحظه شکست بتن با ۰/۷۵ درصد الیاف به نسبت بتن با ۰/۵ درصد، مقدار لنگر پیچشی بیشینه در سیکل‌های دوم و سوم بعد از شکست در بتن با ۰/۷۵ درصد به نسبت بتن با ۰/۵ درصد الیاف افزایش داشته است. بتن بعد از شکست عملاً نقشی در تحمل لنگر ندارد و این لنگر توسط الیاف به روش پل زدن تا لحظه گسیختگی تحمل می‌شود. هرچه مقدار الیاف بیشتر باشد میزان تحمل لنگر پیچشی نیز بیشتر شده است.

مراجع

- [1] Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., and Koh, K. T. (2012). *Tensile behavior of ultra-high performance hybrid fiber reinforced concrete*. Cement and Concrete Composites, 34(2), 172-184.
- [2] Fischer, G., and Li, V. C. (2007). *Effect of fiber reinforcement on the response of structural members*. Engineering Fracture Mechanics, 74(1), 258-272.
- [3] Sinha, S. N., and Naraine, K. S. (1991). *Technical note. Energy dissipation in brick masonry under cyclic biaxial compressive loading*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 91(1), 173-181.
- [4] Chopra, A. K., (2011). 4th Edition. *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hal
- [5] Tavakoli, H. R., and Fallahtabar, M. (2014). *Experimental evaluation of the flexural behavior of self-compacting reinforced fibrous concrete beam under cyclic loading*, Sharif Civil Engineering Journal, 31(4.1), 125-133.
- [6] Nili, M., and Afroughsabet, V. (2010). *Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete*. International journal of impact engineering, 37(8), 879-886.
- [7] Tavakoli, H. R., Sadrmomtazi, A., Lotfiomran, A. and Fallahtabar, M. (2013). *Evaluation of energy absorption capability in fiber reinforced self-compacting concrete containing nano-silica particles*, Sharif Civil Engineering Journal, 31(1.1), 71-82.
- [8] Mazloom, M. and Mehrvand, M. (2015). *Estimating of Torsional Capacity of Self Compacting Concrete Beams*, Amirkabir Journal of Science and Research (Civil & Environmental Engineering) (AJSR - CEE), Vol. 47, pp. 13- 15
- [9] Wang, Xiaohan, Bingkang Liu, and Cong Zhang. "Seismic behavior of recycled aggregate concrete beams under cyclic torsion." *Construction and Building Materials* 129 (2016): 193-203.
- [10] Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M. and Amziane, S. (2016). *Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading*. Construction and Building Materials, 126, 253-262.
- [11] FEMA, ATC. (2007) *461/Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*, Applied Technology Council, Redwood City, CA : 113.
- [12] EFNARC. (2002). *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*.
- [13] ASTM C39, (1996). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Annual book of ASTM standards, 4.
- [14] Xu, Wu, Lin-Hai Han, and Wei Li. *Seismic performance of concrete-encased column base for hexagonal concrete-filled steel tube: experimental study*. Journal of Constructional Steel Research 121 (2016): 352-369