

The effect of employing micro-silica in concrete on ductility of exterior reinforced concrete beam-column joint at ambient temperature and after exposure to high temperatures of fire

Ramezan ali Izadifard^{1*}, Alireza Hajishabani²

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ABSTRACT

The present study has been conducted with the main objective of evaluating the influence of employing micro-silica in the mix proportion of concrete on the ductility behavior of exterior reinforced concrete (RC) beam-column joint (BCJ) at ambient temperature as well as after exposure to high temperatures of fire. In this way, six similar scaled RC BCJ specimens were fabricated under two conditions of utilizing and not utilizing micro-silica in concrete. BCJ specimens were subjected to cyclic loading at two conditions of ambient temperature and 24 hours after exposure to the heating regimes with target temperatures of 400 and 600. Based on results at the ambient temperature, the utilization of micro-silica was accompanied by the predominant mechanism of beam rocking movement in the flexural failure mode, negligible changes in the ductility factor, and noticeable enhancement in the energy dissipation. Under the applied heating regimes, relative reductions in the mentioned parameters (relative to the corresponding counterparts at ambient temperature) were intensified for the BCJs due to the 7% replacement of cement by micro-silica, so that under the effect of the 600 heating regime, relative reduction values in ductility factor, cumulative energy dissipation, and maximum load increased by 13.6%, 26.0%, and 13.4% and reached to considerable reductions of 51.9%, 64.1%, and 46.7%, respectively. Also, despite the observation of shear failure mode for all heated BCJs, employing micro-silica led to noticeable changes in the details of damage mechanisms under the effect of the 600 heating regime and led to more brittle failure at the joint core.

ARTICLE INFO

Receive Date: 07 June 2025

Revise Date: 07 August 2025

Accept Date: 05 September 2025

Keywords:

Reinforced concrete
Exterior beam-column joint
High temperatures
Fire
Micro-silica
Ductility
Energy dissipation
Cyclic loading

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.526347.3750

*Corresponding author: Ramezanali Izadifard
Email address: izadifard@eng.ikiu.ac.ir

اثر کاربرد میکروسیلیس در بتن مصرفی بر شکل پذیری اتصال تیر- ستون خارجی بتن مسلح در دمای محیط و پس از تحمل حرارت‌های ناشی از آتش‌سوزی

رضانعلی ایزدیفرد^{۱*}، علیرضا حاجی شعبانیان^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشجوی دوره دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی اثرگذاری کاربرد میکروسیلیس بر رفتار شکل پذیری اتصال خارجی بتن مسلح در دمای معمولی و همچنین پس از اثر حرارت‌های زیاد آتش‌سوزی صورت گرفته است. بدین جهت، شش نمونه اتصال خارجی مقیاس شده مشابه در حالات کاربرد و عدم کاربرد میکروسیلیس ساخته شد و نمونه‌ها در شرایط دمای محیط و همچنین پس از اثر دو رژیم حرارتی با دماهای هدف ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که در دمای محیط اثر کاربرد میکروسیلیس با بروز مکانیسم غالب حرکت گهواره‌ای المان تیر در مود شکست خمشی اتصال، تغییر جزئی در ضریب شکل پذیری و افزایش قابل توجه در ظرفیت استهلاک انرژی همراه بوده است. این در حالیست که تحت اثر دو رژیم حرارتی اعمال شده، کاهش نسبی در پارامترهای مذکور (نسبت به مقادیر متناظر در دمای محیط) بواسطه جایگزینی ۷٪ از سیمان مصرفی با میکروسیلیس تشدید یافت، طوریکه تحت اثر رژیم حرارتی ۶۰۰ درجه، مقادیر کاهش نسبی در ضریب شکل پذیری، استهلاک انرژی تجمعی و بار حداکثر بترتیب بمیزان ۱۳/۶٪، ۲۶/۰٪ و ۱۳/۴٪ در مقایسه با حالت عدم کاربرد میکروسیلیس افزایش یافت و به مقادیر قابل توجه ۵۱/۹٪، ۶۴/۱٪ و ۴۶/۷٪ رسید. همچنین، علیرغم بروز گسیختگی برشی برای کلیه نمونه‌های اتصال حرارت دیده، کاربرد میکروسیلیس تغییرات قابل توجهی را در جزئیات الگوی خرابی برشی تحت رژیم حرارتی با دمای هدف ۶۰۰ درجه ایجاد نمود و موجب بروز خرابی شکننده‌تری در هسته اتصال گردید.

کلمات کلیدی: اتصال خارجی، بتن مسلح، حرارت، آتش‌سوزی، میکروسیلیس، شکل پذیری، استهلاک انرژی، بارگذاری چرخه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.526347.3750	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.526347.3750	۱۴۰۵/۰۱/۳۱	۱۴۰۴/۰۶/۱۴	۱۴۰۴/۰۶/۱۴	۱۴۰۴/۰۵/۱۷	۱۴۰۴/۰۳/۱۷
رضانعلی ایزدیفرد					*نویسنده مسئول:	
Izadifard@eng.ikiu.ac.ir					پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

از گذشته تا کنون، کاربرد مواد سیمانی مکمل^۱ در بتن با هدف جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با این مواد و همچنین دستیابی به خصوصیات مطلوب مورد توجه محققین و مهندسين فعال در حوزه ساخت سازه‌ها قرار داشته است. با توجه به مشکلات زیست محیطی حاصل از فرآیند تولید سیمان، تلاش‌های زیادی صورت گرفته است تا کاربرد مواد سیمانی مکمل بخشی از نیاز به استفاده از سیمان در ساخت سازه‌های بتنی را کاهش دهد [۲۰ و ۲۱]. در این زمینه پژوهش‌های فراوانی بویژه در سال‌های اخیر انجام گرفته تا با شناسایی مزایای بکارگیری این مواد در ساخت بتن، بهره‌گیری از آن‌ها برای ارتقای خصوصیات مطلوب بتن تازه و سخت شده مورد توجه قرار گیرد [۲]. افزودنی‌های معدنی نظیر متاکائولین^۲ و زئولیت^۳، مواد بازیافتی نظیر خاکستر سرباره کوره‌های آهن گدازی^۴، پودر میکروسیلیس^۵، خاکستر بادی^۶، خاکستر زغال سنگ و همچنین نانو ذراتی نظیر نانو سیلیس و نانو متاکائولین از جمله مواد مذکور بشمار می‌روند که مزایای کاربرد آن‌ها در بتن مورد توجه قرار گرفته است [۱-۹]. مواد سیمانی مکمل بدلیل متفاوت بودن شدت خاصیت پوزولانی، اندازه و شکل ریز ذرات تشکیل دهنده آنها تغییرات کمی و کیفی متفاوتی را در مشخصه‌های بتن تازه و سخت شده ایجاد می‌کنند. همچنین مقدار مصرفی این مواد یا عبارتی دیگر درصد‌های مختلف جایگزینی سیمان با هریک از این مواد نیز می‌تواند تغییرات متفاوت چشمگیری را در خواص مذکور ایجاد نماید. پیچیدگی این تغییرات زمانی مضاعف می‌گردد که اثر حرارت نیز بر ریز ساختار بتن و خصوصیات مختلف آن مد نظر قرار گیرد. بدین جهت تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه کاربرد مواد سیمانی مکمل انجام شده که گستره تغییرات خواص مذکور را تحت درصد‌های مختلف از کاربرد این مواد بررسی نموده‌اند [۱-۱۶]. بعنوان نمونه در مطالعه لای و همکاران [۱۶] بررسی اثر درصد‌های مختلف از کاربرد سه ماده پوزولانی شامل خاکستر بادی، سرباره کوره آهن گدازی و میکروسیلیس (سیلیکا فوم)^۷ بر خصوصیات مکانیکی بتن در دمای معمولی و همچنین پس از تجربه اثر حرارت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های آن‌ها نشان داده است که کاربرد هر سه ماده اثر بخشی قابل توجهی در افزایش تراکم فاز جامد در ریز ساختار بتن سخت شده داشته و بدین طریق موجب افزایش قابل توجه مقاومت بتن در دمای معمولی شده است. با این حال، نحوه و میزان اثر گذاری این سه ماده بر روی خصوصیات پسماند بتن پس از اثر حرارت‌های آتش‌سوزی متفاوت بوده است، بنحویکه کاربرد هریک از مواد خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی موجب افزایش مقاومت پسماند بتن تحت اثر رژیم‌های حرارتی با دماهای هدف مختلف شده است. این درحالیست که کاربرد میکروسیلیس (سیلیکا فوم) بدلیل ایجاد ریز ساختار بسیار متراکم‌تر رفتار پیچیده‌تری را پس از تجربه اثر حرارت رقم زده است، طوریکه بعنوان نمونه، جایگزینی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ از سیمان مصرفی با این ماده موجب شده است که اثر رژیم حرارتی با دمای هدف ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش مقاومت پسماند فشاری همراه باشد و تحت اثر تنش‌های حرارتی تشدید یافته در ساختار بسیار متراکم بتن، ریز ترک‌های حرارتی بیشتری (در مقایسه با نمونه کنترل حرارت دیده و فاقد مواد سیمانی مکمل) شکل گیرد.

میکروسیلیس یکی از مواد سیمانی مکمل بشمار می‌رود که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین بوده و مزایای بکارگیری آن در بتن مصرفی اجزای سازه‌ای معرفی گردیده است. ذرات میکروسیلیس بسیار ریز بوده و حاوی درصد زیادی از سیلیکون دی‌اکسید می‌باشد که خاصیت پوزولانی بسیار زیادی به این ماده می‌بخشد. بدلیل ریز بودن، ذرات میکروسیلیس به داخل ریز منافذ داخلی در خمیر سیمان نفوذ کرده و بصورت پرکننده^۸ عمل می‌کنند [۱۷]. بدین ترتیب مکانیسم عملکرد مؤثر میکروسیلیس در بتن شامل سه شیوه اثر گذاری می‌شود [۱۸ و ۱۹]: ۱- واکنش با آهک آزاد

¹ Supplementary cementitious materials

² Metakaolin

³ Zeolite

⁴ Blast furnace slag

⁵ Micro-silica

⁶ Fly ash

⁷ Silica fume

⁸ Filler

موجود در خمیره سیمان که بموجب آن هیدروکسید کلسیم آزاد در خمیره سیمان طی واکنش با ذرات میکروسیلیس موجب تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته (تقویت ژل C-S-H) می‌گردد. ۲- نفوذ در ریز منافذ آزاد موجود در ناحیه تماسی انتقالی^۱ سنگدانه‌ها و خمیره سیمان و تقویت استحکام این ناحیه ۳- پر کردن منافذ و متراکم نمودن ماتریس خمیره سیمان. تحت اثر این مکانیسم عملکردی، ویژگی‌های مطلوبی از قبیل افزایش مقاومت فشاری، بهبود مقاومت کششی، افزایش دوام، کاهش نفوذپذیری [۲۰] و افزایش تراکم در میکروساختار بتن [۲۱]، افزایش مقاومت نسبت به واکنش آلكالی-سیلیکایی و کاهش آب انداختگی در بتن تازه [۲۲] حاصل می‌شود. اگرچه میکروسیلیس در زمره مواد سیمانی مکمل و پرکننده منافذ ریز ساختار بتن قرار می‌گیرد، اما نحوه تغییرات قابل ملاحظه‌ای که بموجب کاربرد آن در مشخصه‌های مکانیکی بتن حاصل می‌شود تفاوت‌های مهمی را در مقایسه با برخی دیگر از مواد سیمانی مکمل نشان داده است [۱۶]. منشأ اصلی این تفاوتها در تراکم بخشی زیاد این ماده به فاز جامد ریز ساختار بتن مربوط می‌شود که حاصل تقویت چشمگیر محصولات هیدراسیون خمیره سیمان تحت تأثیر خاصیت پوزولانی زیاد میکروسیلیس می‌باشد.

با توجه به مطالعات پیشین، اثربخشی مطلوب میکروسیلیس در بهبود خصوصیات بتن محدود به درصد‌های جایگزینی مشخصی است [۲۳]. نتایج بررسی‌های برخی مطالعات نظیر [۲۴] حاکی از آنست که حداکثر اثربخشی مطلوب این ماده در بهبود خواص مقاومتی بتن در دمای محیط به ازای جایگزینی ۱۰٪ وزنی از سیمان مصرفی حاصل می‌شود و کاربرد بیش از این مقدار منجر به افت خصوصیات مطلوب بتن بویژه خصوصیات مکانیکی و کارایی بتن تازه می‌گردد. مطالعه زیاری و بهنود [۲۵] که در سال ۲۰۰۸ و با در نظر گرفتن اثر حرارت‌های آتش‌سوزی انجام گرفته نیز نشان می‌دهد که به ازای جایگزینی ۶٪ و ۱۰٪ از وزن سیمان مصرفی با میکروسیلیس، مقادیر کاهش نسبی مقاومت فشاری تحت اثر رژیم‌های حرارتی (کاهش نسبت به مقاومت بتن در دمای محیط) در مقایسه با کاهش نسبی این پارامتر برای بتن متناظر بدون کاربرد میکروسیلیس بیشتر شده است. همچنین طبق نتایج آن‌ها، افزایش درصد جایگزینی از ۶٪ به ۱۰٪، با افزایش تنش‌های حرارتی در ساختار بتن و همچنین افزایش در افت خصوصیات مقاومتی بتن تحت اثر حرارت همراه بوده است.

علیرغم مطالعات متعدد در خصوص اثرات کاربرد میکروسیلیس در بتن، هنوز برخی جنبه‌های اثرگذاری آن در کاربردهای سازه‌ای مورد بررسی قرار نگرفته است. یکی از جنبه‌های مذکور مربوط به نحوه اثرگذاری این ماده بر تغییرات رفتاری اعضای بتن مسلح پس از وقوع آتش‌سوزی است. با توجه به ویژگی تراکم بخشی قابل توجه این ماده در ریز ساختار بتن و تأثیر چشمگیری که در پر کردن ریز منافذ داخلی دارد، می‌توان انتظار داشت که کاربرد این ماده بدلیل تنش‌های حرارتی زیاد در ساختار بسیار متراکم بتن تحت اثر حرارت‌های آتش‌سوزی [۲۵]، تغییرات رفتاری قابل توجهی را برای اعضای مختلف سازه نظیر نواحی اتصال تیر- ستون ایجاد نماید.

نواحی اتصال تیر- ستون یکی از بخش‌های مهم در ساختمان‌های بتن مسلح بشمار می‌روند که رفتار لرزه‌ای آنها تأثیر پذیری قابل توجهی از مصالح مصرفی در طرح اختلاط بتن دارد [۲۶]. مصالح مصرفی در بتن (بویژه مواد سیمانی مکمل) بر استحکام ناحیه تماسی انتقالی در ریز ساختار بتن و همچنین بر مقاومت چسبندگی تماسی^۲ میان بتن و آرماتورها تأثیر گذار است [۲۶]. از این رو در مطالعات مختلفی تغییرات رفتار لرزه‌ای اتصالات بتن مسلح تحت تأثیر کاربرد مصالح مختلف در طرح اختلاط بتن مورد توجه قرار گرفته است [۲۶]. شایان ذکر است که این بررسی‌ها تاکنون محدود به دمای محیط بوده و تأثیر گذاری آن‌ها بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات پس از آتش‌سوزی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. بعنوان نمونه، شاو و سیل [۲۷] در پژوهشی که در سال ۲۰۲۰ به انجام رسیده، به ارزیابی اثر کاربرد خاکستر بادی بر عملکرد لرزه‌ای اتصال خارجی بتن مسلح در دمای معمولی پرداخته‌اند. بررسی‌های آن‌ها در خصوص کاربرد خاکستر بادی در بتن نمونه‌های اتصال خارجی (ساخته شده با مقیاس^۱) نشان داد که

¹ Interfacial transitional zone

² Bonding strength

جایگزینی ۲۰٪ وزنی از سیمان مصرفی با خاکستر بادی همراه با کاربرد فوق روان کننده موجب ارتقای ضریب شکل پذیری بمیزان ۱۲٪ و همچنین بهبود استهلاک انرژی بمیزان ۱۰٪ در مقایسه با نمونه کنترلی (بدون کاربرد ماده افزودنی در بتن) شده است. در مطالعه دیگری که در سال ۲۰۲۰ به انجام رسیده، شیمالا و همکاران [۲۸] تأثیرات کاربرد ترکیبی و غیر ترکیبی نانو سیلیس^۱ و خاکستر بادی را بر روی عملکرد اتصال خارجی بتن مسلح در دمای معمولی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاربرد ۲۰٪ خاکستر بادی همراه با ۲/۵٪ نانو سیلیس موجب افزایش چشمگیری در ظرفیت باربری نمونه‌های اتصال شده است. مطالعه دیگری که در سال ۲۰۱۴ توسط شانکار و سوچی [۲۹] بر روی نمونه‌های اتصال خارجی بتن مسلح (ساخته شده با مقیاس ۱/۴) به انجام رسیده نیز نشان داد که کاربرد متاکائولین همراه با خاکستر معدن^۲ (بترتیب بمیزان ۱۰٪ و ۳۰٪ وزنی از سیمان مصرفی) موجب بهبود استهلاک انرژی، شکل پذیری، ظرفیت باربری و مقاومت برشی در نمونه‌های اتصال شده است.

بررسی مطالعات پیشین در زمینه اثر مصالح مختلف بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات جامعی در خصوص بررسی تأثیر کاربرد مواد سیمانی مکمل بر رفتار لرزه‌ای پسا-آتش اتصالات بتن مسلح صورت نگرفته است. از سوی دیگر در بین مواد سیمانی مکمل پر کاربرد، مطالعه‌ای در خصوص تأثیرگذاری میکروسیلیس بر رفتار مذکور حتی در دمای محیط نیز یافت نمی‌شود. این درحالیست که در بین مواد مختلف، میکروسیلیس تأثیرگذاری قابل توجهی بر خصوصیات بتن دارد و با توجه به اثر تراکم بخشی چشمگیر این ماده بر ریز ساختار بتن می‌توان تأثیر گذاری قابل توجهی را بر پارامترهای عملکرد لرزه‌ای اتصالات بویژه تحت اثر حرارت انتظار داشت. چنین تغییراتی در مطالعه حاضر برای ناحیه اتصال تیر-ستون خارجی و تحت اثر کاربرد میکروسیلیس مورد توجه قرار گرفته است.

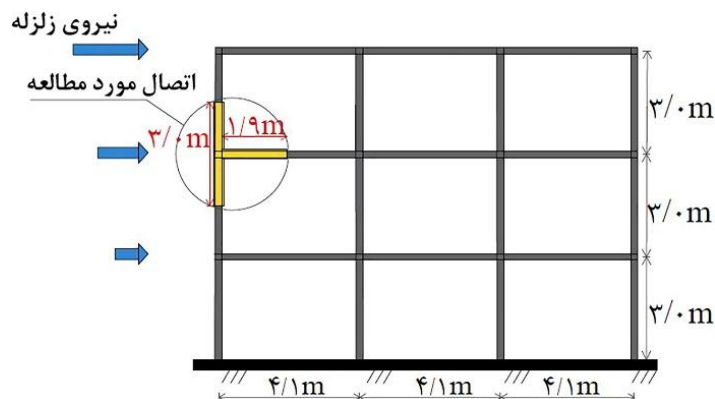
۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- روند کلی پژوهش

بمنظور انجام بررسی‌های تجربی، شش نمونه اتصال خارجی بتن مسلح با جزئیات هندسی و آرماتورهای مشابه و با مقیاس ۱/۴ در آزمایشگاه ساخته شد، بنحویکه در طرح اختلاط بتن مصرفی برای سه نمونه اتصال هیچ ماده افزودنی مورد استفاده قرار نگرفت اما در بتن سه نمونه دیگر از پودر میکروسیلیس بصورت جایگزین ۷٪ وزنی از سیمان مصرفی در طرح اختلاط پایه بهره گرفته شد. سایر اقدامات اصلی در این تحقیق شامل اعمال رژیم‌های حرارتی بر چهار نمونه اتصال (دو نمونه حاوی میکروسیلیس و دو نمونه بدون میکروسیلیس) در کوره الکتریکی مستقر در آزمایشگاه و سپس اعمال بارگذاری چرخه‌ای رفت و برگشتی بر روی دو نمونه اتصال در دمای محیط (نمونه‌های کنترلی) و همچنین چهار نمونه اتصال حرارت دیده می‌باشد. پس از انجام آزمایشات بارگذاری، مودهای خرابی نمونه‌ها، منحنی‌های بار-تغییر مکان چرخه‌ای و منحنی‌های پوش متناظر، و همچنین تغییرات شکل پذیری و استهلاک انرژی تجمعی مورد ارزیابی مقایسه‌ای قرار گرفتند. لازم به ذکر است که فرآیند حرارت دهی نمونه‌های حرارتی در سن ۵۵ روز و بارگذاری جانبی بر روی کلیه نمونه‌ها در سن ۵۶ روز صورت گرفته است.

¹ Nano-slica
² Quarry Dust

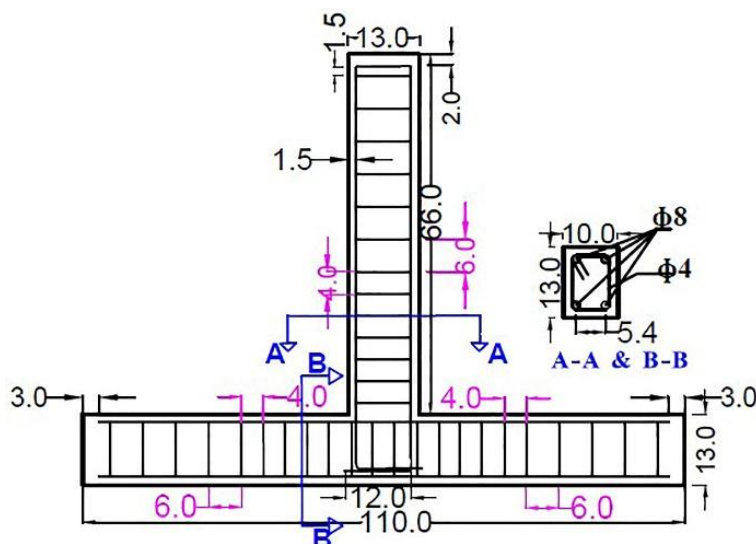
۲-۲- جزئیات نمونه‌های اتصال و مشخصات مصالح مصرفی



شکل ۱: قاب بتن مسلح در نظر گرفته شده برای مطالعه

مطابق شیوه مرسوم در بسیاری از مطالعات، نمونه‌های اتصال آزمایشگاهی بعنوان جزء جدا شده مقیاس شده از یک قاب بتن مسلح در نظر گرفته و طراحی می‌شوند، بنحویکه جداسازی از نقاط میانی اعضای تیر و ستون که محل نقاط عطف لنگر خمشی تحت بار زلزله می‌باشند، صورت می‌پذیرد [۳۰ و ۳۱]. قاب در نظر گرفته شده در این تحقیق و همچنین جزئیات اتصال مقیاس شده مورد بررسی در آزمایشگاه بترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ قابل ملاحظه است.

طراحی اعضای تیر و ستون و جزئیات چشمه اتصال که در شکل ۲ ارائه گردیده، مطابق دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای در استانداردهای ACI318-19 [۳۲] و ACI352R-02 [۳۳] صورت گرفته است. مطابق شکل ۲، ابعاد و جزئیات مقاطع تیر و ستون یکسان می‌باشد و اصل ستون قوی- تیر ضعیف برای اتصال مورد نظر رعایت گردیده است.



شکل ۲: جزئیات نمونه‌های اتصال مقیاس شده (ابعاد و فواصل برحسب سانتیمتر)

در جدول ۱ نسبت‌های وزنی مصالح برای دو نوع بتن مصرفی در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. هر یک از طرح‌های اختلاط ارائه شده در این جدول برای ساخت سه نمونه اتصال (یک نمونه کنترلی و دو نمونه حرارتی) مورد استفاده قرار گرفته است. بتن حاصل از طرح اختلاط ۱ (طرح اختلاط پایه) از رده مقاومتی ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد. در طرح اختلاط ۲، میزان ۷٪ وزنی از سیمان مصرفی در طرح اختلاط پایه با پودر میکروسیلیس جایگزین شده و بتن حاصل در رده مقاومتی ۳۸ مگاپاسکال قرار دارد. بعبارتی دیگر، بواسطه کاربرد ۷٪ میکروسیلیس در طرح اختلاط ۲ حدود ۵۲٪ افزایش در مقاومت فشاری بتن نسبت به طرح اختلاط پایه حاصل شده است. همچنین سنگدانه‌ها از نوع سنگدانه‌های شکسته شده با توزیع دانه‌بندی استاندارد بوده و اندازه حداکثر بعد سنگدانه‌ها ۹/۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین درصد عناصر میکروسیلیس مورد استفاده در جدول ۲ ارائه گردیده است. آرماتورهای طولی آجدار مورد استفاده در اعضای تیر و ستون از نوع AII و به قطر ۸ میلی‌متر بوده و مقاومت‌های کششی تسلیم و نهایی این آرماتورها با آزمایش کشش مستقیم بترتیب برابر ۳۶۵ و ۵۴۰ مگاپاسکال و مدول الاستیک نیز $2/0.2 \times 10^5$ مگاپاسکال تعیین شده است. خاموت‌های عرضی برای هر شش نمونه اتصال بصورت قلاب لرزه‌ای (خاموت با خم ۱۳۵ درجه) بکار رفته است. همچنین خاموت‌های عرضی از نوع فولاد نرمه غیر آجدار بوده و مقاومت‌های تسلیم و نهایی آن در آزمایش کشش مستقیم بترتیب برابر ۲۳۶ و ۳۴۹ مگاپاسکال و مدول الاستیک نیز $2/0.5 \times 10^5$ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱: نسبت‌های وزنی مصالح در طرح‌های اختلاط بکار رفته برای ساخت بتن

مصالح	سیمان	ماسه	شن	میکروسیلیس	فوق روان کننده	آب
آب	۱/۰	۱/۹	۱/۷۶	-	-	۰/۶۷۵
آب	۱/۰	۱/۹	۱/۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۰۷۵	۰/۶۷۵

جدول ۲: درصد عناصر تشکیل دهنده میکروسیلیس

SO_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SiO_2
۰/۰۵	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۵۹	۹۸/۶

۲-۳- ساخت و آماده سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه بمنظور کاربرد میکروسیلیس در طرح اختلاط شماره ۲ از شیوه ترکیب میکروسیلیس و آب بصورت دوغاب استفاده شده است. پروسه ساخت بتن با استفاده از میکسر مستقر در آزمایشگاه برای هر دو نوع بتن مصرفی در ساخت نمونه‌های اتصال بنحو مشابهی صورت گرفته است، با این تفاوت که برای ساخت بتن نمونه‌های حاوی میکروسیلیس در مرحله اضافه کردن آب در میکسر، دوغاب میکروسیلیس (محلول آب و میکروسیلیس) به مخلوط سنگدانه‌ها و سیمان افزوده گردید. همچنین اگرچه در این تحقیق دو طرح اختلاط برای ساخت نمونه‌های اتصال بکار رفته است و پروسه ساخت هر یک از نمونه‌ها نیز بصورت مجزا انجام گرفته، اما روند بتن‌ریزی در قالب‌ها برای هر شش نمونه بنحو کاملاً مشابهی تکرار شده است. بمنظور تعیین مقاومت فشاری بتن آماده شده برای نمونه‌های اتصال در سنین معین، تعداد ۱۲ نمونه مکعبی با طول اضلاع ۱۰ سانتی‌متر از بتن هر یک از نمونه‌های اتصال تهیه گردید. بتن‌ریزی در داخل قالب‌ها در دو لایه و متراکم نمودن هر لایه نیز بر روی میز لرزان انجام گرفته است. خارج کردن نمونه‌های بتن‌ریزی شده از قالب‌ها ۲۴ ساعت پس از بتن‌ریزی انجام شد و بلافاصله پس از آن عمل‌آوری نمونه‌ها آغاز گردید. فرآیند عمل‌آوری کلیه نمونه‌ها تا سن ۲۸ روز و بصورت نگهداری در گونی خیس و پلاستیک صورت پذیرفته است. پس از اتمام دوره عمل‌آوری، هر یک از نمونه‌ها در یک دوره زمانی ۲۷ روزه تا زمان اعمال حرارت در سن ۵۵ روز در محیط آزمایشگاه (دمای ۲۷ الی ۲۸ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شد.

۲-۴- نام‌گذاری نمونه‌ها و مقادیر مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده

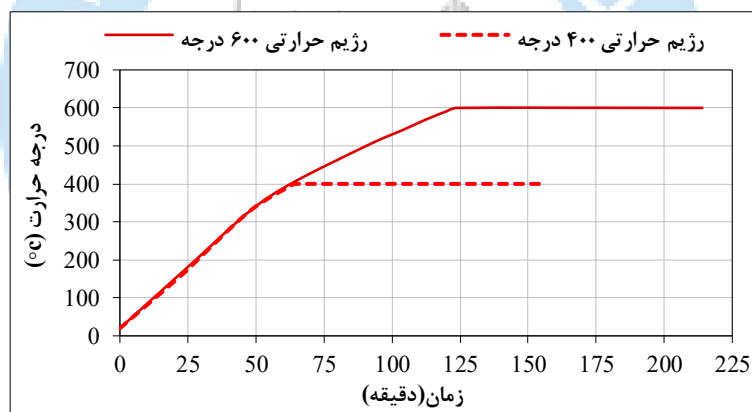
نام‌گذاری نمونه‌های اتصال در این تحقیق با توجه به دو حالت جایگزینی یا عدم جایگزینی ۷٪ از سیمان طرح اختلاط پایه با پودر میکروسیلیس و همچنین وضعیت تجربه یا عدم تجربه رژیم‌های حرارتی ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه مطابق جدول ۳ انجام گرفته است. در این جدول مقادیر متوسط مقاومت‌های فشاری اندازه‌گیری شده از بتن بکار رفته در ساخت هر نمونه اتصال نیز ارائه شده است. هر یک از مقادیر مقاومت‌های این جدول میانگین مقادیر تعیین شده از سه نمونه مکعبی به طول اضلاع ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد که برای سنین ۲۸، ۵۶ و ۸۴ روز ارائه شده است. همچنین لازم به ذکر است که مقاومت‌های ۵۶ روزه در این جدول در دو وضعیت بدون اثر حرارت برای کلیه نمونه‌ها و همچنین ۲۴ ساعت پس از تجربه اثر حرارت (در سن ۵۵ روز) برای نمونه‌های حرارتی تعیین شده است.

جدول ۳: مقادیر مقاومت‌های فشاری اندازه‌گیری شده از بتن نمونه‌های اتصال

نمونه اتصال	شرایط	مقاومت فشاری متوسط (Mpa)			
		در سن ۷ روز	در سن ۲۸ روز	در سن ۵۶ روز	۲۴ ساعت پس از قرارگیری در معرض حرارت در سن ۵۵ روز
SP	بدون میکروسیلیس - بدون قرارگیری در معرض حرارت	۱۸/۱	۲۴/۷	۳۲/۶	-
SP400	بدون میکروسیلیس - پس از تجربه رژیم حرارتی ۴۰۰ درجه	۱۸/۹	۲۵/۱	۳۱/۷	۲۷/۱
SP600	بدون میکروسیلیس - پس از تجربه رژیم حرارتی ۶۰۰ درجه	۲۰/۱	۲۶/۸	۳۴/۱	۱۹/۲
SPM	با میکروسیلیس - بدون قرارگیری در معرض حرارت	۲۸/۴	۳۸/۵	۴۶/۲	-
SPM400	با میکروسیلیس - پس از تجربه رژیم حرارتی ۴۰۰ درجه	۲۸/۳	۳۸/۴	۴۶/۰	۳۹/۷
SPM600	با میکروسیلیس - پس از تجربه رژیم حرارتی ۶۰۰ درجه	۲۸/۲	۳۶/۷	۴۳/۹	۲۳/۱

۲-۵- اعمال رژیم های حرارتی

اعمال اثر حرارت و شبیه سازی اثر آتش سوزی بر نمونه های اتصال، با بهره گیری از دو رژیم حرارتی مختلف با دماهای هدف ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد و مطابق منحنی های شکل ۳ صورت گرفته است. بمنظور اعمال حرارت، نمونه های اتصال به همراه نمونه های مکعبی متناظر درون کوره الکتریکی مستقر در آزمایشگاه با ظرفیت حرارتی ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده شده است. مطابق رژیم های حرارتی، حرارت دهی نمونه ها در داخل کوره الکتریکی از دمای محیط آغاز شده و پس از افزایش دما و رسیدن دمای داخل محفظه کوره به دمای هدف (دمای ۴۰۰ یا ۶۰۰ درجه سانتی گراد)، فاز نگهداشت حرارت بمدت ۹۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. پس از اتمام مدت زمان فاز نگهداشت، حرارت دهی متوقف و درب کوره الکتریکی اندکی باز شد و بدین ترتیب نمونه ها بصورت طبیعی خنک شدند. لازم به توضیح است که نگهداشت دمای هدف در منحنی های حرارتی، بمنظور ایجاد فرصت کافی برای نفوذ حرارت به داخل بتن و استقرار دمای هدف در مقاطع اعضای تیر و ستون در نظر گرفته شد. همچنین، مدت زمان ۹۰ دقیقه برای فاز نگهداشت نیز با توجه به نتایج ارائه شده در مطالعه [۳۴] انتخاب شده است. مطابق مقاله مذکور که به بررسی اثر آتش سوزی بر رفتار اتصال بتن مسلح داخلی می پردازد، مدت زمان ۹۰ دقیقه برای اثر حرارت تأثیرات قابل توجهی بر شدت خرابی در ناحیه چشمه اتصال و همچنین کاهش شکل پذیری و ظرفیت باربری پس از اثر آتش سوزی داشته است.

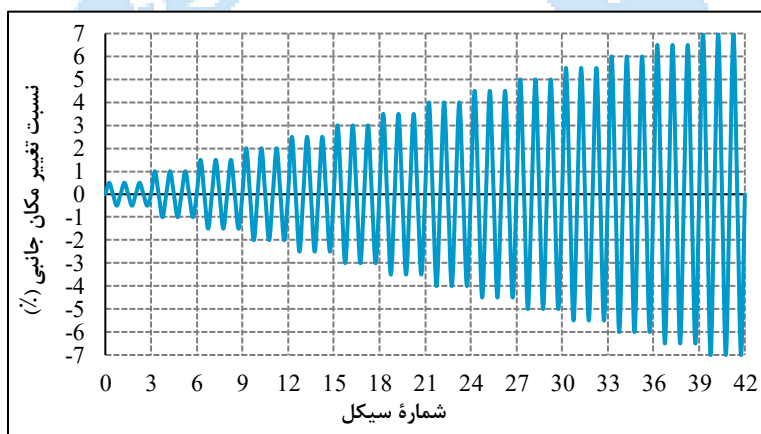


شکل ۳: رژیم های حرارتی اعمال شده در کوره الکتریکی

۲-۶- اعمال بارگذاری چرخه ای جانبی

بمنظور ارزیابی عملکرد لرزه ای نمونه های اتصال، بارگذاری چرخه ای جانبی رفت و برگشتی بر روی نمونه ها در سن ۵۶ روز صورت گرفته است، بنحویکه نمونه های حرارت دیده ۲۴ ساعت پس از حرارت دهی در کوره الکتریکی (در سن ۵۵ روز) و پس از خنک شدن بصورت طبیعی تحت بارگذاری قرار گرفتند. پروتکل بارگذاری چرخه ای اعمال شده بر نمونه های اتصال در شکل ۴ ارائه شده است. مطابق این پروتکل پرکاربرد [۳۵ و ۳۶] که بصورت تغییر مکان-کنترل تعریف می گردد، بارگذاری از نسبت تغییر مکان جانبی ۰/۵٪ آغاز می شود. هر سطح از تغییر مکان جانبی شامل سه سیکل بارگذاری تکرار شونده است و در هر مرحله ۰/۵٪ به نسبت تغییر مکان جانبی قبلی افزوده می گردد.

در شکل ۵ پیکربندی^۱ تست بارگذاری بصورت شماتیک قابل ملاحظه است. مطابق این شکل، نمونه‌های اتصال بمیزان ۹۰ درجه نسبت به وضعیت اصلی در قاب شکل ۱ دوران یافته و بر روی یک قاب فولادی بارگذاری قرار گرفته‌اند. قاب در راستای بار جانبی مقید بوده و اعمال بار نیز توسط یک جک مکانیکی با ظرفیت نیروی ۵ تن در فاصله ۳/۵ سانتی‌متر از انتهای تیر (عضو قائم) اعمال می‌گردد. مطابق شکل ۵، دو انتهای عضو افقی (دو انتهای ستون‌ها) بر روی تکیه‌گاه غلطکی قرار گرفته و دوران ستون در این نقاط تکیه‌گاهی آزاد است. علاوه بر این، دوران انتهای تیر نیز در محل اعمال نیرو توسط جک بواسطه تعبیه لولا (پین) در این محل آزاد است. بدین ترتیب شرایط متناسب با فرض جداسازی اتصال از محل نقاط عطف لنگر خمشی در قاب شکل ۱، کاملاً رعایت شده است. همچنین، بمنظور اعمال بار محوری، نیروی افقی ۶ تن (معادل ۲۰٪ از ظرفیت فشاری خالص مقطع) توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰ تن به ستون‌ها اعمال گردیده و مقدار آن در طول مدت تست بارگذاری ثابت نگه داشته شده است. بمنظور اندازه‌گیری و ثبت تغییر مکان رأس عضو قائم (تیر) نمونه‌های اتصال در هر دو راستای اعمال بار از دو سنسور مبدل تغییر مکان خطی^۲ با ظرفیت اندازه‌گیری تغییر مکان ۷/۵ سانتی‌متر استفاده شده است. علاوه بر این، یک سنسور اندازه‌گیری بار نیز جهت تعیین مقادیر بار در هنگام بارگذاری بکار گرفته شده است. در حین بارگذاری، داده‌های سنسورهای مذکور بواسطه اتصال به یک دستگاه ثبت داده (دیتا لاگر^۳)، بر روی کامپیوتر ثبت و ضبط گردیده است.

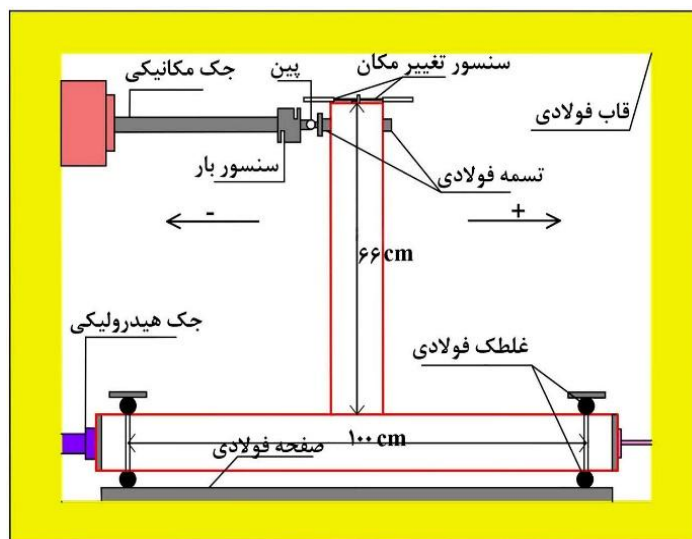


شکل ۴: پروتکل بارگذاری تغییر مکان-کنترل

¹ Setup

² Linear vertical displacement transducer

³ Data logger



شکل ۵: پیکربندی تست بارگذاری

۷-۲- تعیین الگوی ترک خوردگی نمونه‌های اتصال

بمنظور مقایسه دقیق تغییرات الگوهای ترک خوردگی نمونه‌های اتصال در مراحل مختلف از پروسه بارگذاری، ترک‌های شکل گرفته بر روی وجوه نمونه‌ها با رنگ‌های مختلفی علامت گذاری گردید. در جدول ۴ رنگ‌های بکار رفته و سطوح تغییر مکان جانبی متناظر مشخص شده است.

جدول ۴: رنگ‌های بکار رفته برای علامت‌گذاری ترک‌ها در مراحل مختلف بارگذاری

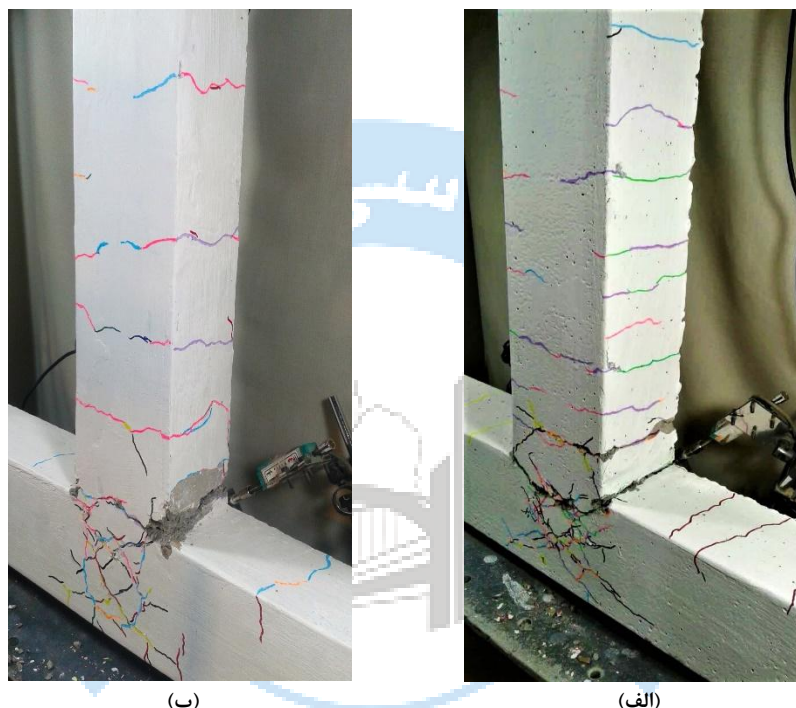
رنگ	سبز روشن	بنفش	صورتی	آبی روشن	نارنجی	سبز تیره	قرمز	زرد	سورمه‌ای	مشکی
نمونه SP	-	۰/۵	۱/۰	۱/۵	۲/۰	۲/۵	۳/۰	۳/۵	۴/۰	۴/۵ و بالاتر
نمونه SPM و نمونه‌های	۰/۵	۱/۰	۱/۵	۲/۰	۲/۵	۳/۰	۳/۵	۴/۰	۴/۵	۵/۰ و بالاتر

حرارت دیده

۳- مودهای خرابی نمونه‌های اتصال

مودهای شکست نمونه‌های اتصال SP و SPM در پایان نسبت تغییر مکان جانبی ۶/۱۰٪ در شکل ۶ نشان داده شده است. طبق مشاهدات، آغاز ترک خوردگی‌ها برای نمونه SP (در نسبت‌های تغییر مکان جانبی ۰/۵٪ و ۱٪) با شکل‌گیری و انتشار ریز ترک‌های خمشی صورت پذیرفت و پس از آن اگرچه در سیکل‌های بعدی ریز ترک‌های مورب برشی نیز در هسته اتصال ظاهر شد، اما اغلب ریز ترک‌ها تا پایان نسبت تغییر مکان جانبی ۱/۵٪ از نوع خمشی بوده است. برای نمونه SPM، الگوی ترک‌های اولیه بصورت تشکیل همزمان ریز ترک‌های خمشی و برشی ظاهر گردید و لذا ایجاد ریز ترک‌های مورب در ناحیه چشمه اتصال برای نمونه حاوی میکروسیلیس سریع‌تر صورت پذیرفت. با این حال، در مراحل بعدی بارگذاری روند کلی توسعه ترک خوردگی‌ها برای نمونه‌های SP و SPM بصورت مشابهی ادامه یافت بنحویکه تا پایان نسبت تغییر مکان جانبی ۴/۱۰٪ سهم ریز ترک‌های برشی از ترک‌های جدید بیشتر بود. با پیشروی بارگذاری در چرخه‌های بعدی بارگذاری پهنای ترک‌های خمشی بتدریج افزایش یافته و زمینه تشکیل مفصل پلاستیک خمشی برای هر دو نمونه ایجاد گردید، با این تفاوت که تشکیل مفصل پلاستیک برای نمونه حاوی میکروسیلیس (SPM) در محل ترک‌های خمشی اولیه با پهنای افزایش یافته بر روی مرز مشترک اتصال تیر و ستون بوده اما مفصل پلاستیک برای نمونه SP اندکی

بالتر و در مجاورت مرز مشترک اتصال در انتهای تیر تشکیل شده است. رفتار کلی شکست خمشی برای هر دو نمونه در نسبت‌های تغییر مکان بالا (۵٪ الی ۶/۵٪) بشکل مشابهی با افزایش پهنای ترک‌های خمشی و همچنین رشد امتداد ریز ترک‌های قطری در ناحیه چشمه اتصال ادامه یافت. همچنین می‌توان اظهار داشت که اگرچه در نسبت‌های تغییر مکان جانبی بالا (بویژه نسبت تغییر مکان جانبی ۷٪) حرکت گهواره‌ای^۱ تیر حول مرز مشترک اتصال برای هر دو نمونه قابل مشاهده بود، اما این مکانیسم برای نمونه SPM غالب‌تر بوده و توسعه مفصل خمشی در محل مرز مشترک اتصال تیر و ستون از طریق این مکانیسم صورت پذیرفت.



شکل ۶: مود شکست (در نسبت تغییر مکان جانبی ۶/۵٪) برای (الف) نمونه SPM (ب) نمونه SP

در شکل ۷ الگوی ترک‌ها و مودهای گسیختگی برای دو نمونه اتصال SP400 و SPM400 قابل ملاحظه است. بررسی الگوهای ترک خوردگی برای هر دو نمونه نشان می‌دهد که اثر رژیم حرارتی با دمای هدف ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب گردید که از همان آغاز بارگذاری چرخه‌ای شمار ریز ترک‌های مورب و گسترش آن‌ها در چشمه اتصال بیشتر از ریز ترک‌های خمشی باشد. با پیشرفت مراحل بارگذاری، روند کلی ترک خوردگی‌ها برای هر دو نمونه بصورت مشابهی ادامه یافت طوریکه افزایش ترک‌های برشی در ناحیه چشمه اتصال با سرعت بیشتری نسبت به شکل‌گیری ترک‌های خمشی جدید (که غالباً از مبدأ ریز ترک‌های حرارتی ایجاد می‌شد) صورت پذیرفت. تحت اثر گسترش قابل توجه ترک‌های مورب برشی در ناحیه هسته اتصال تا پایان نسبت تغییر مکان جانبی ۴/۵٪، بروز مود خرابی ترد برشی برای هر دو نمونه محرز گردید. در چرخه‌های بعدی بارگذاری در نسبت‌های تغییر مکان جانبی ۶٪ و بالاتر، علیرغم تداوم این روند کلی مشابه برای هر دو نمونه، یک تفاوت در جزئیات پیشروی ترک‌ها میان آن‌ها آشکار گشت. این تفاوت بصورت شکل‌گیری ترک‌های مورب بیشتر برای نمونه SPM400 در نواحی مختلف بویژه بر روی وجوه المان تیر ظاهر گردید.

¹ Rocking movement

چنین ترک‌هایی از مبدأ ریز ترک‌های حرارتی شکل گرفته و افزایش طول امتداد آن‌ها در نسبت‌های تغییر مکان بالا از طریق بهم پیوستن ریز ترک‌های حرارتی و ترک‌های خمشی اولیه، بنحو قابل توجهی صورت پذیرفت. چنین الگویی با توجه به ریز ساختار داخلی بسیار متراکم بتن در نمونه حاوی میکروسیلیس و شکل‌گیری ریز ترک‌های حرارتی بیشتر تحت اثر رژیم حرارتی قابل توجیه می‌باشد.

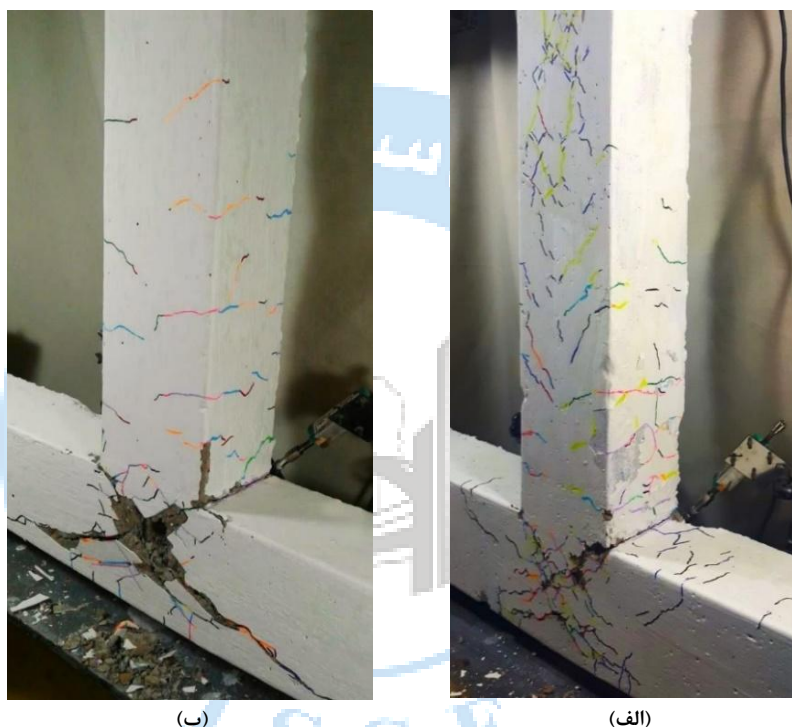


شکل ۷: مود شکست (در نسبت تغییر مکان جانبی ۷/۰٪) برای نمونه (الف) SPM400 (ب) نمونه SPM600

مودهای شکست مربوط به دو نمونه اتصال SP600 و SPM600 در شکل ۸ ارائه شده است. الگوهای ترک خوردگی برای این دو نمونه بنحوی شکل گرفت که تا پایان نسبت تغییر مکان جانبی ۲/۵٪ شمار ریز ترک‌های قطری در چشمه اتصال بسیار بیشتر از ریز ترک‌های خمشی بوده است. با ادامه روند بارگذاری تا پایان نسبت تغییر مکان جانبی ۴/۵٪، شکل‌گیری و انتشار ترک‌های مورب برای هر دو نمونه با سرعت ادامه یافت اما گسترش و امتداد یافتن ترک‌های قطری در راستای آرماتورهای طولی در ناحیه تحتانی چشمه اتصال و همچنین افزایش پهنای آن‌ها برای نمونه SP600 بیشتر از نمونه SPM600 بوده است. تحت تأثیر چنین تفاوتی طول محدوده گوه گسیختگی محصور میان ترک‌ها در هسته اتصال برای نمونه SPM600 بنحو قابل توجهی کمتر بوده است. بنظر می‌رسد که این تفاوت در طول محدوده گوه گسیختگی بدلیل مقاومت پسماند کششی و فشاری بیشتر برای بتن تحت تأثیر کاربرد میکروسیلیس در نمونه SPM600 بروز یافته است.

تفاوت دیگر بین دو نمونه تا پایان تغییر مکان جانبی ۴/۵٪، در شکل‌گیری ترک‌های مورب از محل ریز ترک‌های حرارتی است که بر روی وجوه تیر و در فواصل مختلف از مرز مشترک اتصال تیر و ستون در نمونه SPM600 شکل گرفتند و همزمان با پیشروی چرخه‌های بارگذاری ضمن پیوستن به یکدیگر و ریز ترک‌های خمشی گسترش یافتند. با پیشروی بارگذاری در سیکل‌های بعدی، ضمن تقویت تفاوت‌های فوق‌الذکر، برای هر دو نمونه بروز خرابی ریزشی نسبتاً نرم اجزای بتن (ناشی از شکست پیوند میان سنگدانه‌ها و خمیره سیمان ضعیف شده بر اثر حرارت) در تغییر مکان‌های جانبی بالا صورت پذیرفت. چنین ریزش‌هایی که عمدتاً در محل ترک‌های قطری در هسته اتصال (بویژه حول محل تلاقی ترک‌های قطری) و تحت اثر

باز و بسته شدن های متوالی حین بارگذاری و همچنین بدلیل اعوجاج برشی در ناحیه هسته اتصال صورت پذیرفت، زمینه تفاوت دیگری را بین نحوه تشدید خرابی برای دو نمونه رقم زد، بنحویکه برای نمونه SP600 مکانیسم خرابی ریزشی نسبتاً نرم از تغییر مکان جانبی ۵٪ آغاز شد و بتدریج با پیشرفت بارگذاری بر میزان ریزش نسبتاً نرم اجزای بتن افزوده گردید. این درحالیست که بروز خرابی ریزشی بتن در ناحیه هسته اتصال برای نمونه حاوی میکروسیلیس (SPM600) در نسبت تغییر مکان جانبی ۶٪ و با شدت کمتری آغاز شد و پیشرفت آن نیز در مقایسه با نمونه SP600 بنحو قابل توجهی محدودتر بود. تحت اثر چنین تفاوتی شکست شکننده تری برای نمونه SPM600 در نسبت های تغییر مکان جانبی ۵٪ و بالاتر صورت پذیرفت.

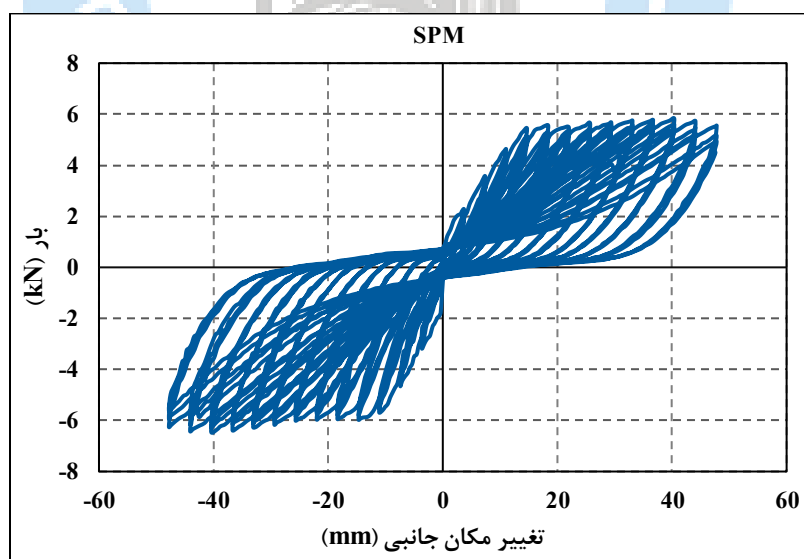


شکل ۸: مود شکست (در نسبت تغییر مکان جانبی ۶/۵٪) برای (الف) نمونه SPM600 (ب) نمونه SP600

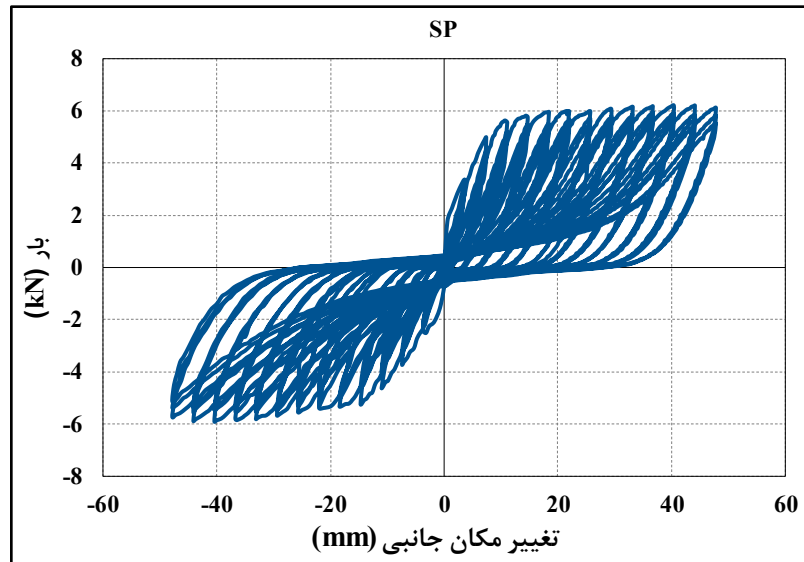
۴- پاسخ بار - تغییر مکان نمونه های اتصال

پاسخ های بار-تغییر مکان نمونه های اتصال تحت بارگذاری چرخه ای جانبی در شکل ۹ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این منحنی ها از ثبت تغییر مکان های رأس تیر در حین بارگذاری رفت و برگشتی استخراج شده است. از بررسی و مقایسه این منحنی ها می توان دریافت که رفتار چرخه ای نمونه های SPM و SP تا حد زیادی مشابه بوده و هر دو نمونه تا پایان نسبت تغییر مکان جانبی ۶/۵٪ روند باربری مطلوب و شکل پذیری را نشان داده اند. همچنین، برای هر دو نمونه افزایش بار حداکثر در سیکل های بارگذاری تا نسبت تغییر مکان جانبی ۶٪ ادامه داشته و پس از آن افت اندکی در مقاومت دو نمونه ایجاد شده است و اختلاف بار حداکثر بین این دو نمونه نیز جزئی می باشد. لذا جایگزینی ۷٪ از سیمان مصرفی با میکروسیلیس در بتن مصرفی تغییر چشمگیری در قابلیت باربری نمونه های اتصال ایجاد نموده است. نکته دیگر آنکه آثار جمع شدگی در حلقه های بار-تغییر مکان برای این دو نمونه کنترلی در مقایسه با نمونه های حرارت دیده متناظر بمیزان قابل توجهی کمتر می باشد.

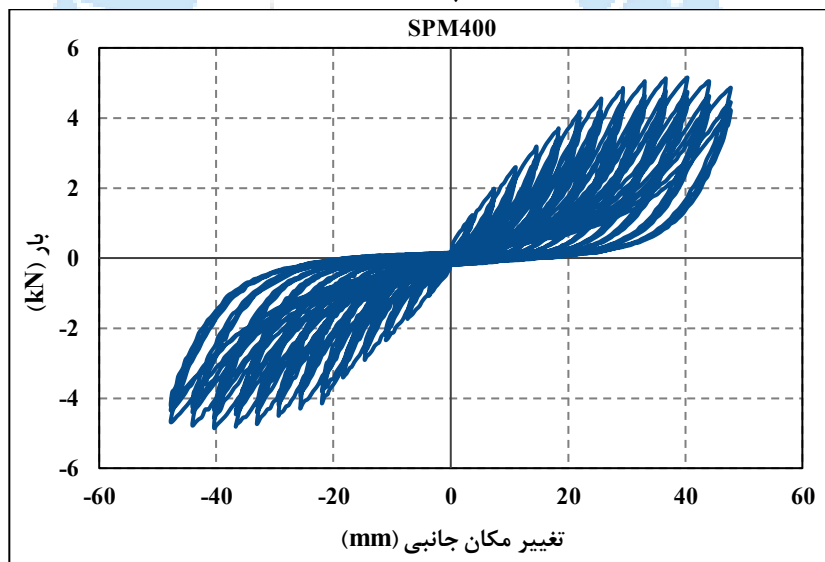
از بررسی پاسخ نمونه‌های اتصال قرار گرفته در معرض رژیم‌های حرارتی با دماهای هدف ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مشخص می‌شود که اثر حرارت‌های اعمالی در هر دو حالت کاربرد و عدم کاربرد میکروسیلیس در بتن موجب کاهش قابل ملاحظه قابلیت باربری نمونه‌های اتصال در کلیه تغییر مکان‌های جانبی شده است. چنین افت‌هایی در قابلیت باربری تحت تأثیر تضعیف قابل توجه بتن حرارت‌دیده، افزایش سایز ترک‌های قطری و شکل‌گیری گوّه گسیختگی برشی در هسته اتصال برای هر دو حالت کاربرد و عدم کاربرد میکروسیلیس رخ داده است. همچنین باید توجه داشت که تحت تأثیر حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، افتی که در خصوصیات مکانیکی و مقاومتی آرماتورها ایجاد می‌شود، پس از خنک شدن نیز تا حد زیادی برگشت‌ناپذیر است [۳۷]. از این رو قابلیت باربری نمونه‌های اتصال تحت اثر رژیم حرارتی ۶۰۰ درجه (مطابق شکل‌های ۹-د و ۹-و) کاهش چشمگیری را نشان داده‌اند. همچنین مشاهده می‌گردد که هرچند بصورت کلی آثار جمع‌شدگی در حلقه‌های بار-تغییر مکان نمونه‌های حرارت‌دیده در هر دو حالت کاربرد یا عدم کاربرد میکروسیلیس بنحو قابل توجهی افزایش داشته است، اما این افزایش در دو نمونه حرارت‌دیده حاوی میکروسیلیس (بویژه برای نمونه SPM600) با شدت بیشتری رخ داده است. چنین رفتاری احتمالاً بدلیل ساختار متراکم‌تر خمیره سیمان در ناحیه تماسی با آرماتورها و متعاقباً آسیب‌پذیری بیشتر چسبندگی تماسی میان آرماتورها و بتن تحت اثر تنش‌های حرارتی بیشتر صورت گرفته است. چنانکه می‌توان انتظار داشت که با افزایش دمای هدف از ۴۰۰ به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، ضمن تشدید اثر فشار منفذی داخلی در خمیره سیمان، آسیب‌پذیری چسبندگی تماسی میان آرماتورها و خمیره سیمان متراکم‌تر بیشتر از حالت عدم کاربرد میکروسیلیس (ساختار کم تراکم بتن) تشدید یابد و احتمال لغزش آرماتورها در ناحیه مهاری در چشمه اتصال قوت گیرد. علاوه بر این، از بررسی منحنی‌های بار-تغییر مکان چرخه‌ای بدست آمده می‌توان دریافت که کاهش محسوس در سطح محصور حلقه‌های مربوط به نمونه‌های SPM400 و SPM600 در مقایسه با نمونه‌های متناظر بدون کاربرد میکروسیلیس (بترتیب نمونه‌های SP400 و SP600) رخ داده است. بنابراین می‌توان اظهار داشت که به ازای هر سطح مشخص از تغییر مکان جانبی، نمونه‌های حرارت‌دیده حاوی میکروسیلیس قابلیت استهلاک انرژی کمتری در چرخه‌های بارگذاری داشته‌اند.



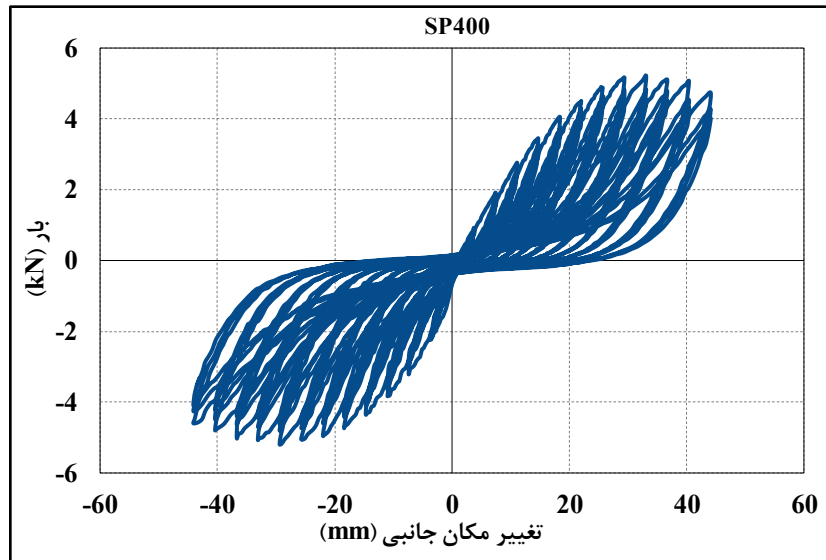
(الف)



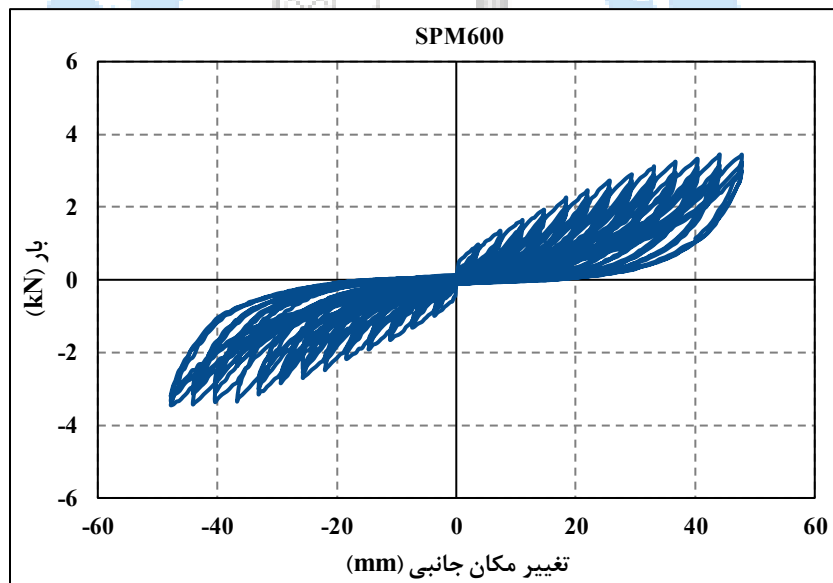
(ب)



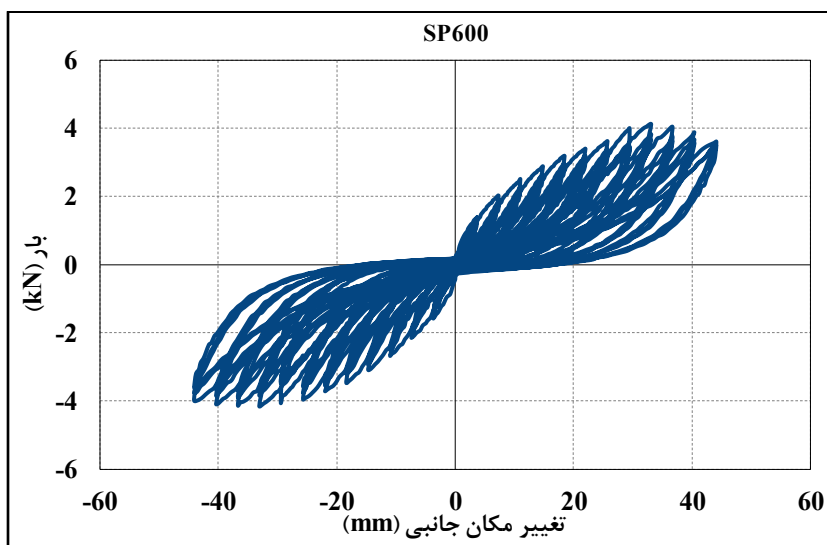
(پ)



(ج)



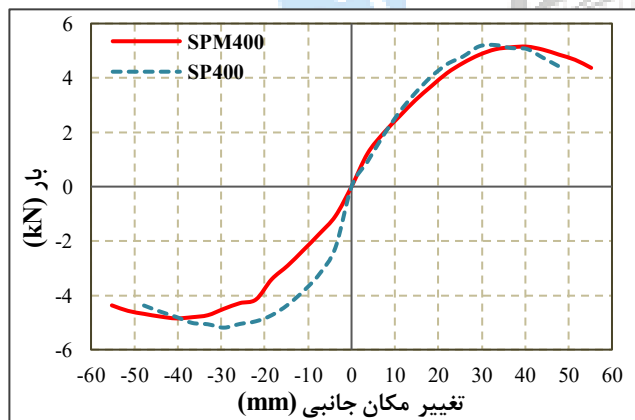
(د)



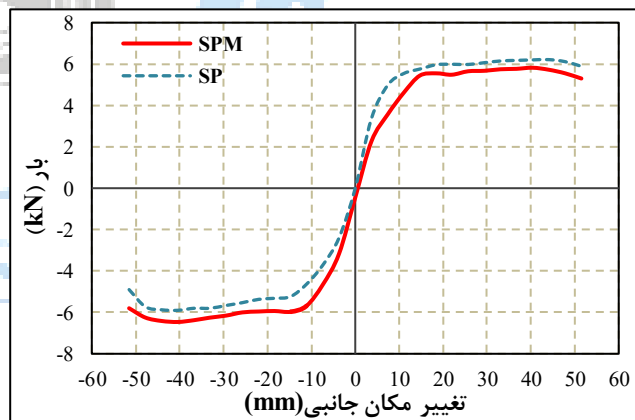
(و)

شکل ۹: منحنی‌های بار - تغییر مکان چرخه‌ای متعلق به نمونه‌های (الف) SPM (ب) SP (پ) SPM400 (ج) SP400 (د) SPM600 (و) SP600

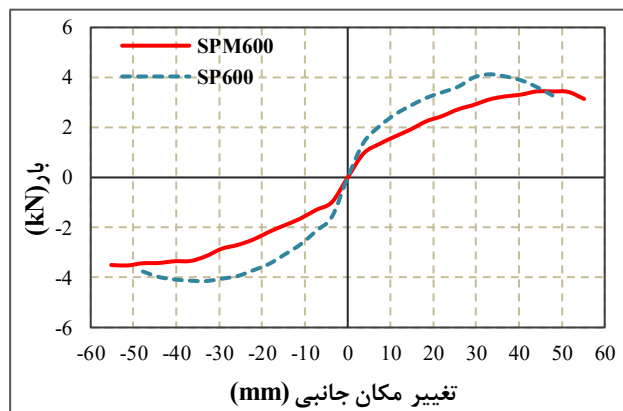
در شکل ۱۰ منحنی‌های پوش مربوط به نمونه‌های متناظر در دو حالت کاربرد و عدم کاربرد میکروسیلیس مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. مطابق شکل ۱۰-الف، قابلیت باربری نمونه‌های SP و SPM در سیکل‌های مختلف تغییرات مشابهی را بویژه از تغییر مکان جانبی ۱۴/۷ میلی‌متر (نسبت تغییر مکان ۲٪) نشان داده‌اند و منحنی‌های پوش مربوطه از تغییر مکان مذکور اختلاف اندکی داشته‌اند.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۰: مقایسه منحنی‌های پوش بار-تغییر مکان نمونه‌های (الف) SPM و SP (ب) SPM400 و SP400 (ج) SPM600 و SP600

مطابق شکل‌های ۱۰-ب و ۱۰-ج، بموجب اثر حرارت کاهش قابل توجهی در قابلیت باربری نمونه‌های اتصال در هر دو حالت کاربرد یا عدم کاربرد میکروسیلیس در بتن حاصل شده است. با این وجود، به ازای کاربرد میکروسیلیس مقادیر افت بیشتری در قابلیت باربری تحت اثر رژیم‌های حرارتی ایجاد شده است. در این خصوص بیشترین اختلاف در مقادیر بار (به ازای نسبت تغییر مکان جانبی یکسان) بین نمونه‌های SP600 و SPM600 بمقدار ۱/۲۴ کیلو نیوتن و مربوط به نسبت تغییر مکان جانبی ۳/۵٪ می‌باشد که در این سطح از تغییر مکان، بار حداکثر برای نمونه SPM600 بمقدار ۳۱/۵٪ کمتر از SP600 بوده است. همچنین بیشینه اختلاف بار بین نمونه‌های SP400 و SPM400 نیز مقدار ۱/۴۵ کیلو نیوتن و مربوط به نسبت تغییر مکان جانبی ۱/۵٪ است که در آن، بار حداکثر برای نمونه SPM400 بمقدار ۳۹٪ کمتر از نمونه SP400 بوده است.

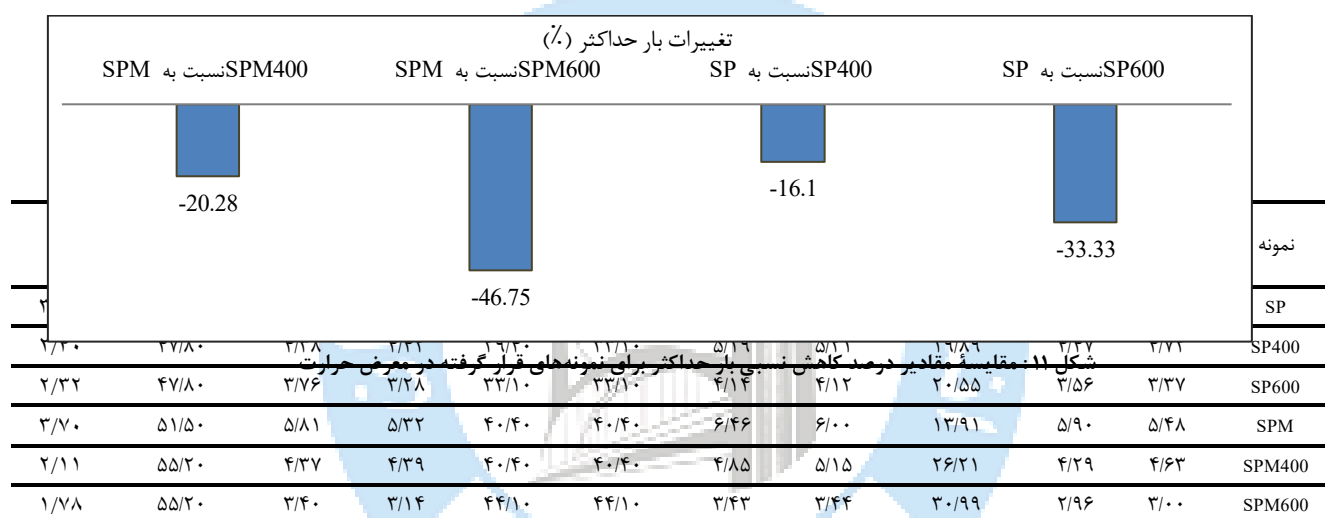
در شکل ۱۱ مقادیر افت نسبی ظرفیت بار حداکثر برای نمونه‌های حرارتی نسبت به نمونه‌های کنترلی متناظر مورد مقایسه قرار گرفته است. مطابق این نتایج، تحت اثر هر دو رژیم حرارتی، افت نسبی در ظرفیت باربری نمونه‌های حرارتی حاوی میکروسیلیس در مقایسه با افت نسبی بار حداکثر برای نمونه‌های حرارتی بدون کاربرد میکروسیلیس بیشتر بوده و این اختلاف با افزایش دمای هدف از ۴۰۰ به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان اظهار داشت که بموجب جایگزینی ۷٪ از سیمان مصرفی با میکروسیلیس، افت نسبی در ظرفیت باربری پسماند اتصال تحت اثر حرارت (بوژه رژیم حرارتی ۶۰۰ درجه) تشدید یافته است.

۵- تغییرات ضریب شکل پذیری

شکل پذیری بعنوان یک معیار مهم برای ارزیابی قابلیت تحمل تغییر شکل‌های غیر الاستیک اجزای سازه‌ای بدون کاهش قابل توجه در پارامترهای مقاومت و سختی مورد توجه قرار می‌گیرد. قابلیت شکل پذیری زیاد برای نواحی اتصال در سازه‌ها بدلیل حساسیت عملکرد آن‌ها در مقابل بارهای جانبی ضروری بشمار می‌رود. ضریب شکل پذیری (μ) که برای ارزیابی قابلیت مذکور برای اجزای سازه‌ای بکار می‌رود، مطابق رابطه ۱ بصورت نسبت تغییر مکان نهایی (δ_u) به تغییر مکان تسلیم (δ_y) تحت اثر بار جانبی تعریف می‌گردد [۳۶].

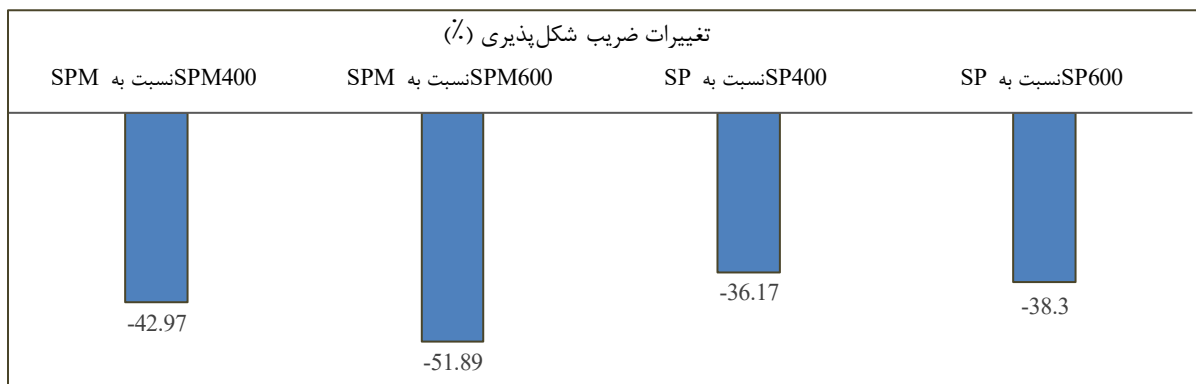
$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (1)$$

در مطالعه حاضر تعیین تغییر مکان تسلیم متوسط و تغییر مکان نهایی برای نمونه‌های اتصال بر اساس رویکرد تعادل انرژی و با استفاده از شیوه ترسیم منحنی‌های دو خطی معادل پوش بار-تغییر مکان که در مطالعات [۳۸ و ۳۹] تشریح گردیده، انجام شده است. همچنین مطابق رویکرد مطالعات [۳۸-۴۰]، تغییر مکان نهایی δ_{II} برابر تغییر مکان جانبی رأس تیر در گامی از بارگذاری است که مقاومت نمونه اتصال در نخستین چرخه از آن گام به ۸۵٪ از بار حداکثر تقلیل یابد. بر این اساس، پارامترهای مهم تعیین شده برای نمونه‌های اتصال شامل تغییر مکان تسلیم متوسط (δ_y) و بارهای متناظر با تغییر مکان‌های تسلیم در هر راستا (F_y)، تغییر مکان نهایی (δ_{II}) و بارهای متناظر با تغییر مکان‌های نهایی در هر راستا (F_{II}) به همراه بارهای حداکثر (F_{max}) و تغییر مکان‌های متناظر (δ_{max})، و همچنین ضرایب شکل‌پذیری (μ) در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این جدول برای هر یک از نمونه‌های اتصال، δ_y برابر میانگین تغییر مکان‌های تسلیم در دو راستای بارگذاری و δ_{II} برابر کمترین مقدار از تغییر مکان‌های نهایی برای هر دو راستا است. در شکل ۱۲ نیز مقادیر درصد کاهش نسبی برای ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های حرارت‌دیده (نسبت به



نمونه‌های کنترلی متناظر در دمای محیط) مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۵: مقادیر پارامترهای مهم استخراج شده از منحنی‌های پوش بار-تغییر مکان



شکل ۱۲: مقایسهٔ مقادیر درصد کاهش نسبی ضریب شکل پذیری برای نمونه‌های قرار گرفته در معرض حرارت

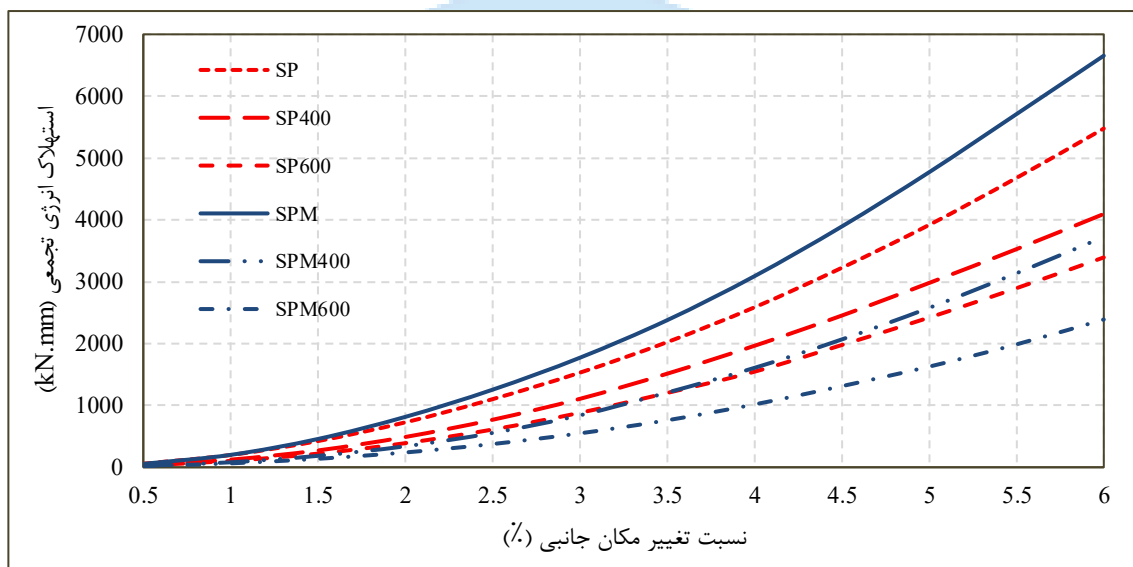
مطابق نتایج جدول ۵، اثر رژیم‌های حرارتی بطور کلی در هر دو حالت کاربرد و عدم کاربرد میکروسیلیس موجب کاهش قابل توجه در مقدار ضریب شکل پذیری شده است. همچنین می‌توان دریافت که تغییر مکان تسلیم نمونه‌های اتصال در هر دو حالت مذکور، تحت اثر دو رژیم حرارتی افزایش یافته است. عبارتی دیگر، هر یک از نمونه‌های حرارت دیده در مقایسه با نمونهٔ کنترلی متناظر دیرتر به تغییر مکان تسلیم (تعیین شده مطابق رویکرد تعادل انرژی) رسیده است. در این خصوص می‌توان مشاهده کرد که در حالت کاربرد ۷٪ میکروسیلیس در بتن مصرفی، افزایش در تغییر مکان تسلیم متوسط برای دو نمونهٔ SPM400 و SPM600 چشمگیرتر بوده است. علاوه بر این، مقادیر تغییر مکان نهایی برای این دو نمونه نیز در مقایسه با مقادیر متناظر برای نمونه‌های حرارت دیدهٔ فاقد میکروسیلیس افزایش داشته است، اما مقادیر افزایشی که در تغییر مکان تسلیم آن‌ها ایجاد شده بیشتر از افزایش در تغییر مکان نهایی است. لذا تحت اثر این تغییرات، کاهش نسبی چشمگیری در مقدار ضریب شکل‌پذیری (نسبت به نمونهٔ کنترلی متناظر) برای دو نمونهٔ SPM400 و SPM600 ایجاد شده است.

مقایسهٔ درصدهای کاهش نسبی در مقدار ضریب شکل‌پذیری برای نمونه‌های حرارت دیده در شکل ۱۲ نیز نشان می‌دهد که اختلاف عددی اندک ۲/۱۳٪ میان مقادیر کاهش نسبی این پارامتر تحت رژیم‌های حرارتی ۴۰۰ و ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در حالت عدم کاربرد میکروسیلیس به اختلاف ۸/۹۲٪ تحت اثر کاربرد میکروسیلیس افزایش یافته است. همچنین بواسطهٔ کاربرد میکروسیلیس، میزان کاهش نسبی در ضریب شکل‌پذیری برای نمونهٔ SPM600 بمیزان ۱۳/۵۹٪ بیشتر از نمونهٔ SP600 بوده است. چنین تغییری با مشاهدهٔ بروز خفیف‌تر مکانیسم ریزشی نسبتاً نرم اجزای بتن هستهٔ اتصال برای نمونهٔ SPM600 (در مقایسه با SP600) نیز همسو بنظر می‌رسد. چنانکه پیشتر در بخش ۹ نیز تشریح گردید، شکست نسبتاً نرم پیوند میان اجزای بتن برای نمونهٔ SP600 در نسبت‌های تغییر مکان جانبی ۵٪ و بالاتر، تا حدودی از شکنندگی گسیختگی برشی اتصال در تغییر مکان‌های جانبی زیاد کاسته و خرابی نسبتاً نرمتری را (نسبت به شکست شکننده‌تر برای نمونهٔ SPM600) تحت بارگذاری جانبی رقم زده است. این در حالیست که برای نمونهٔ SPM600، آغاز خرابی ریزشی اجزای بتن تحت اثر اعوجاج برشی در هستهٔ اتصال، از نسبت تغییر مکان جانبی ۶٪ بوده و تأثیر آن تا پایان بارگذاری نیز نسبتاً اندک می‌باشد.

۶- تغییرات استهلاک انرژی

ظرفیت استهلاک انرژی پارامتر مهمی است که رفتار شکست تدریجی یا ناگهانی سازه را بهنگام اثرگذاری بارهای جانبی وارده رقم می‌زند. هنگامی که تغییر شکل‌های غیر الاستیک ناحیهٔ اتصال تحت بارهای وارده افزایش می‌یابد، ظرفیت استهلاک انرژی بیشتر نقش تعیین‌کننده‌ای را در

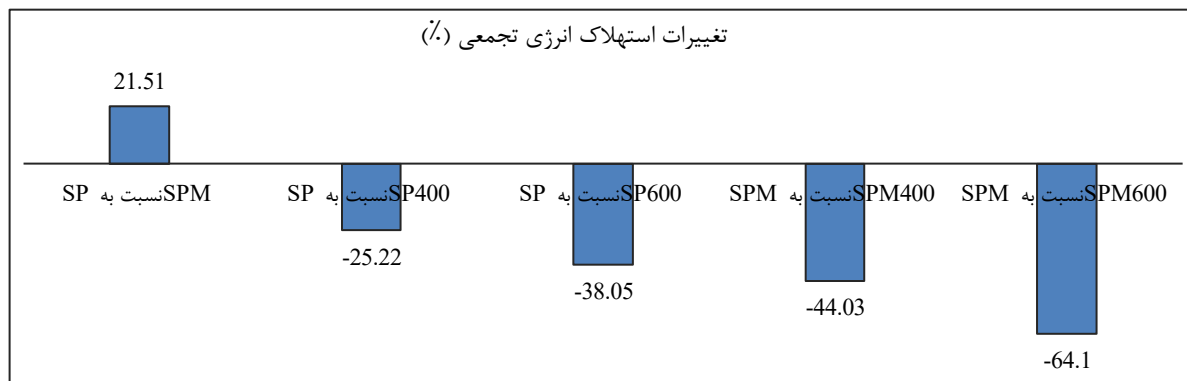
کنترل رفتار شکل‌پذیر ایفا می‌نماید. بدین جهت پارامتر استهلاک انرژی تجمعی^۱ در این مطالعه بمنظور ارزیابی قابلیت استهلاک انرژی نمونه‌های اتصال آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته است. استهلاک انرژی تجمعی تا پایان هر چرخه از بارگذاری، بصورت مجموع سطوح محصور در حلقه‌های بار - تغییر مکان از نخستین چرخه بارگذاری تا پایان چرخه مورد نظر تعریف می‌گردد. بر این اساس، روند تغییرات استهلاک انرژی تجمعی برای نمونه‌های بررسی شده در این تحقیق تا پایان نسبت تغییر مکان جانبی ۶٪ در شکل ۱۳ ارائه شده است. از تغییرات حاصل می‌توان بوضوح دریافت که بیشترین میزان ظرفیت استهلاک انرژی در تغییر مکان‌های افزایشی متعلق به نمونه اتصال SPM بوده و این برتری (بواسطه کاربرد میکروسیلیس در بتن) همزمان با افزایش تغییر مکان‌های غیر الاستیک در مراحل توسعه مفصل پلاستیک خمشی قابل توجه می‌باشد. همچنین تغییرات منحنی‌های مربوط به نمونه‌های حرارت دیده نیز نشان می‌دهد که اثر رژیم‌های حرارتی در هر دو حالت کاربرد و عدم کاربرد میکروسیلیس بصورت افت قابل توجه در استهلاک انرژی تجمعی در سیکل‌های مختلف و همچنین افت چشمگیر در نرخ رشد این پارامتر با تغییر مکان‌های افزایشی همراه بوده است.



شکل ۱۳: مقایسه تغییرات استهلاک انرژی تجمعی نمونه‌های اتصال در نسبت‌های مختلف از تغییر مکان جانبی

در شکل ۱۴ تغییرات نسبی استهلاک انرژی تجمعی در حالات مختلف نسبت به نمونه‌های کنترلی متناظر مورد مقایسه قرار گرفته است. مطابق نتایج این شکل، کاربرد میکروسیلیس موجب گردیده که در دمای محیط مقدار استهلاک انرژی تجمعی تا پایان نسبت تغییر مکان جانبی ۶٪ بمیزان ۲۱/۵۱٪ افزایش یابد. برخلاف این اثر بخشی مطلوب در دمای محیط، کاربرد میکروسیلیس با کاهش‌های چشمگیری در استهلاک انرژی تجمعی تحت اثر رژیم‌های حرارتی اعمال شده همراه بوده و بیشترین مقادیر کاهش نسبی برای این پارامتر به ازای هر دو رژیم حرارتی اعمال شده مربوط به حالات کاربرد میکروسیلیس می‌باشد. در این خصوص بیشترین افت نسبی برای استهلاک انرژی تجمعی متعلق به نمونه SPM600 و بمیزان چشمگیر ۶۴/۱٪ بوده است.

¹ Cumulative energy dissipation



شکل ۱۴: مقایسه مقادیر درصد کاهش نسبی استهلاک انرژی تجمعی در پایان نسبت تغییر مکان جانبی ۶۰٪

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه تجربی رفتار شکل‌پذیری لرزه‌ای و ظرفیت استهلاک انرژی اتصال خارجی در دو حالت کاربرد و عدم کاربرد میکروسیلیس در طرح اختلاط بتن و همچنین در شرایط دمایی محیط و پس از تحمل رژیم‌های حرارتی با دماهای هدف ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد مطالعه و ارزیابی مقایسه‌ای قرار گرفت. انتخاب ماده میکروسیلیس و بررسی اثر آن در این مطالعه، با پیش‌زمینه پژوهشی حاصل از مطالعات پیشین در خصوص اثر تراکم‌بخشی زیاد این ماده در فاز جامد ریز ساختار بتن انجام گرفت. در نهایت با توجه به مشاهدات و نتایج حاصل از تست‌های بارگذاری چرخه‌ای بر روی نمونه‌های اتصال آزمایشگاهی، نتایج زیر بیان می‌گردد:

۱- روند کلی شکل‌گیری و انتشار ترک‌های خمشی بر روی وجوه تیر و ریزترک‌های برشی در هسته اتصال برای دو نمونه SP و SPM تقریباً مشابه بوده و مود شکست نهایی برای هر دو نمونه بصورت خمشی است. با این حال، تحت اثر کاربرد ۷٪ میکروسیلیس، محل مفصل خمشی نسبت به نمونه SP پایین‌تر قرار گرفته و بر روی مرز مشترک اتصال تیر و ستون در نمونه SPM تشکیل شده است. با توجه به مشاهدات حاصل، بنظر می‌رسد که کاربرد میکروسیلیس حرکت گهواره‌ای^{۱۰} المان تیر حول مرز مشترک اتصال را بعنوان مکانیسم غالب در توسعه شکست خمشی تقویت می‌کند.

۲- تحت اثر رژیم حرارتی با دمای هدف ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، روند پیشرفت خرابی برشی و تشکیل گوه گسیختگی در هر دو حالت کاربرد و عدم کاربرد میکروسیلیس تقریباً مشابه بوده است. اثر رژیم حرارتی با دمای هدف ۶۰۰ درجه نیز اگرچه برای هر دو نمونه SP600 و SPM600 موجب بروز گسیختگی در هسته اتصال گردید، اما شدت خرابی و وسعت گوه گسیختگی برای نمونه SP600 بنحو قابل توجهی بیشتر است. طبق مشاهدات، با محدودتر شدن اثر مکانیسم خرابی برشی بتن در نمونه SPM600، میزان شکنندگی گسیختگی برشی در نسبت‌های تغییر مکان جانبی زیاد برای این نمونه بیشتر بوده است.

۳- بواسطه کاربرد ۷٪ میکروسیلیس در بتن نمونه‌های اتصال، تفاوت چشمگیری در دمای معمولی در پاسخ بار-تغییر مکان دو نمونه SP و SPM و قابلیت باربری آن‌ها در چرخه‌های بارگذاری مشاهده نشد. این در حالیست که بموجب کاربرد میکروسیلیس کاهش نسبی در ظرفیت باربری تحت اثر حرارت شدت یافته، بنحویکه تحت اثر رژیم حرارتی ۴۰۰ درجه از مقدار ۱/۱۶٪ به ۲۸/۲۰٪ و تحت رژیم حرارتی ۶۰۰ درجه نیز از ۳۳/۳۳٪ به ۴۶/۷۵٪ رسیده است. بنابراین، با افزایش حرارت در آتش سوزی اثر منفی کاربرد میکروسیلیس بر ظرفیت بار حداکثر اتصال تشدید می‌گردد.

۴- تحت اثر دو رژیم حرارتی، شکل پذیری برای نمونه‌های اتصال بنحو قابل توجهی کاهش یافته است. بموجب کاربرد میکروسیلیس، کاهش نسبی در ضریب شکل پذیری برای نمونه‌های SPM400 و SPM600 بترتیب بمیزان ۶/۸۰٪ و ۱۳/۵۹٪ بیشتر از نمونه‌های حرارت دیده متناظر بدون میکروسیلیس بوده است. بنابراین بواسطه کاربرد میکروسیلیس در بتن، کاهش در شکل پذیری اتصال خارجی تحت اثر حرارت بیشتر می‌شود و افزایش دمای هدف نیز منجر به تشدید این آسیب پذیری می‌گردد.

۵- بموجب کاربرد ۷٪ میکروسیلیس در بتن تغییرات متفاوتی در ظرفیت استهلاک انرژی نمونه‌های اتصال در دمای محیط و پس از اثر حرارت‌های آتش سوزی ایجاد گردید. اثر مثبت کاربرد میکروسیلیس در دمای محیط به روند کاهشی چشمگیری تحت اثر رژیم‌های حرارتی اعمال شده مبدل گردید، بنحویکه مقادیر کاهش نسبی ۴۴/۰٪ و ۶۴/۱٪ در ظرفیت استهلاک انرژی تجمعی برای نمونه‌های SPM400 و SPM600 (نسبت به نمونه‌های کنترلی متناظر) بسیار قابل توجه می‌باشد و دلالت بر لزوم توجه ویژه به پارامتر استهلاک انرژی در کنار ضریب شکل پذیری در مطالعات رفتار شکل پذیری اتصالات در دمای محیط و پس از وقوع آتش سوزی دارد.

مراجع

- [1] Bheel, N., Nadeem, G., Almaliki, A. H., Al-Sakkaf, Y. K., Dodo, Y. A., & Benjeddou, O. (2024). Effect of low carbon marble dust powder, silica fume, and rice husk ash as tertiary cementitious material on the mechanical properties and embodied carbon of concrete. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 41, 101734. DOI:10.1016/j.scp.2024.101734
- [2] Farahzadi, L., Nia, S. B., Shafei, B., & Kioumars, M. (2025). Sustainability assessment of ultra-high performance concrete made with various supplementary cementitious materials. *Cleaner Materials*, 100301. DOI: 10.1016/j.clema.2025.100301
- [3] Sepahi, M.H., (2018). *Pozzolan effect on concrete strength and durability at elevated temperatures*, Master's thesis. Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
- [4] Abdi Moghadam, Mehrdad. (2019). *Investigating the solutions for increasing the strength and durability of concrete at high temperatures and shear strength*. Ph.D thesis. Imam Khomeini International University.
- [5] Seify Asghshahr, M., Sadigh Dalali, P., & Talebzadeh, A. (2023). Investigation on the Compressive Strength of Concrete with Microsilica Additive under Different Durations of Accelerated Steam Curing. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(9), 112-127. DOI: 10.22065/jsce.2023.370274.2972
- [6] Moradi, N., Tavana, M. H., Habibi, M. R., & Amiri, M. (2022). Investigation of mechanical properties and permeability of concrete containing metakaolin, zeolite, and fly ash with two and three compounds. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(10), 100-121. DOI:10.22065/jsce.2022.330111.2736
- [7] Rahmati, S., Tavakoli, E., & Fakhri, M. (2024). Impact of slag replacement with cement on durability and workability of self-compacting concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(8), 65-83. DOI:10.22065/jsce.2024.431045.3300
- [8] Farzad, R., Nohani, E., Ghasab, M., & Heydarimoghadam, A. (2023). Improving the compressive strength of concrete by using nano fly ash and examining the interfacial transition zone (ITZ). *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(6), 5-19. DOI: 10.22065/jsce.2022.352576.2882
- [9] Shahryari, L., Azimi, A., & Ghodomizadeh, G. (2023). The Effect of Simultaneous Use of Bentonite and Zeolite on the Behavior and Durability of SCC Concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(11), 160-180. DOI: 10.22065/jsce.2023.390580.3071
- [10] Singh, H., Tiwary, A. K., & Singh, S. (2023). Experimental investigation on the performance of ground granulated blast furnace slag and nano-silica blended concrete exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 394, 132088. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132088
- [11] Izadifard, R. A., Abdi Moghadam, M., & Sepahi, M. M. (2021). Influence of metakaolin as a partial replacement of cement on characteristics of concrete exposed to high temperatures. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 10(6), 336-352. DOI:10.1080/21650373.2021.1877206

- [12] Moghadam, M. A., & Izadifard, R. A. (2020). Effects of zeolite and silica fume substitution on the microstructure and mechanical properties of mortar at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 253, 119206. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119206
- [13] Singh, H., Tiwary, A. K., & Singh, S. (2023). Experimental investigation on the performance of ground granulated blast furnace slag and nano-silica blended concrete exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 394, 132088.
- [14] Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., & Rongshen, C. (2007). Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and building materials*, 21(3), 539-545. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2005.09.001
- [15] Bastami, M., Baghbadrani, M., & Aslani, F. (2014). Performance of nano-Silica modified high strength concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 68, 402-408. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.026
- [16] Lai, M. H., Huang, Z. C., Wang, C. T., Wang, Y. H., Chen, L. J., & Ho, J. C. M. (2022). Effect of fillers on the behaviour of low carbon footprint concrete at and after exposure to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 51, 104117. DOI:10.1016/j.jobe.2022.104117
- [17] Khan, M. I., & Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35. DOI:10.1016/j.resconrec.2011.09.016
- [18] Singh, A., & Singh, N. (2024). Mechanical properties of silica fume based concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*. DOI:10.1016/j.matpr.2024.05.037
- [19] Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2019). Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content. *Cement and Concrete Research*, 123, 105786. DOI:10.1016/j.cemconres.2019.105786
- [20] Hamada, H. M., Abed, F., Katman, H. Y. B., Humada, A. M., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., ... & Thomas, B. S. (2023). Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete. *Journal of materials research and technology*, 24, 8887-8908. DOI:10.1016/j.jmrt.2023.05.147
- [21] Shelote, K. M., Bala, A., & Gupta, S. (2023). An overview of mechanical, permeability, and thermal properties of silica fume concrete using bibliographic survey and building information modelling. *Construction and Building Materials*, 385, 131489. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.131489
- [22] Medina, N. F., Barluenga, G., & Hernández-Olivares, F. (2015). Combined effect of Polypropylene fibers and Silica Fume to improve the durability of concrete with natural Pozzolans blended cement. *Construction and building materials*, 96, 556-566. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.050
- [23] Luo, T., Hua, C., Li, L., Zhang, T., Lu, X., Li, L. G., & Mostafa, S. A. (2024). The effect of micro silica fume (MSF) content on pore fractal dimension (PFD) and mechanical properties of self-consolidating concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e04065. DOI:10.1016/j.cscm.2024.e04065
- [24] Hanumesh, B. M., Varun, B. K., & Harish, B. A. (2015). The mechanical properties of concrete incorporating silica fume as partial replacement of cement. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5(9), 270.
- [25] Behnood, A., & Ziari, H. (2008). Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 106-112. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2007.06.003
- [26] Mousavi, S. S., & Dehestani, M. (2022). Influence of mixture composition on the structural behaviour of reinforced concrete beam-column joints: A review. *Structures*, 42, 29-52. DOI:10.1016/j.istruc.2022.05.115
- [27] Shaw, S. K., & Sil, A. (2020). Experimental study on cyclic loading characteristics of fly ash as partial replacement of cement in beam-column joint. *Case studies in construction materials*, 13, e00362. DOI:10.1016/j.cscm.2020.e00362
- [28] Shyamala, G., Kumarasamy, K., Ramesh, S., Kalavani, M., and Pillalamarri, S.P. (2020). Influence of nano-silica in beam-column joint flexural properties. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing. 1(872), p. 012169. DOI:10.1088/1757-899X/872/1/012169
- [29] Shankar, G. V., & Suji, D. (2014). Seismic Behaviour of Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joints in High Performance Concrete Using Metakaolin and Partial Replacement with Quarry Dust. *International Scholarly Research Notices*, 2014(1), 361962. DOI:10.1155/2014/361962
- [30] Han, S. W., & Lee, S. H. (2022). Cyclic behavior of high-performance fiber-reinforced cementitious composite corner joints. *Journal of Building Engineering*, 47, 103892. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103892

- [31] Al-Osta, M. A., Khan, U., Baluch, M. H., & Rahman, M. K. (2018). Effects of variation of axial load on seismic performance of shear deficient RC exterior BCJs. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12, 1-20. DOI:10.1186/s40069-018-0277-0
- [32] ACI 318-19 committee., (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary*. Michigan, American concrete institute, Farmington Hills.
- [33] ACI-ASCE committee 352R., (2002). *Recommendations for design of beam-column connections in monolithic reinforced concrete*. Michigan, American concrete institute, Farmington Hills.
- [34] Wang, Y., Kodur, V. K. R., Fu, C., Liu, C., Zhou, H., & Naser, M. Z. (2021). Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame Joints after Exposure to Fire. *ACI Structural Journal*, (3). DOI:10.14359/51731586
- [35] Saghafi, M. H., Shariatmadar, H., & Kheyroddin, A. (2019). Seismic behavior of high-performance fiber-reinforced cement composites beam-column connection with high damage tolerance. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13, 1-20. DOI:10.1186/s40069-019-0334-3
- [36] Kheni, D., Scott, R. H., Deb, S. K., & Dutta, A. (2015). Ductility Enhancement in Beam-Column Connections Using Hybrid Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*, 112(2). DOI:10.14359/51687405
- [37] Tao, Z., Wang, X. Q., & Uy, B. (2013). Stress-strain curves of structural and reinforcing steels after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(9), 1306-1316. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000676
- [38] Choi, S. H., Kim, J. H., Jeong, H., & Kim, K. S. (2022). Seismic behavior of beam-column joints with different concrete compressive strengths. *Journal of Building Engineering*, 52, 104484. DOI: 10.1016/j.job.2022.104484
- [39] Li, Z., Zhai, D., & Li, J. (2022). Seismic behavior of the dune sand concrete beam-column joints under cyclic loading. In *Structures*, 40, 1014-1024. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.04.083
- [40] Ma, K., Wei, J., Li, H., Nie, Q., Zhang, M., Wu, R. & Li, S. (2024). Seismic performance of joints in coal ash slag concrete frames. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 178(3), 1-16. DOI:10.1680/jstbu.

