



## بررسی ویژگی‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری و کاربرد آن در اتصال تیر به ستون

طیبه یوسفی قلعه سلیمی، حسین تاجمیر ریاحی\*

دانشکده‌ی مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۶  
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۰۶  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۴  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۱۴

### کلمات کلیدی:

بتن ژئوپلیمری  
اتصال تیر به ستون بتنی  
طرح اختلاط  
رفتار چرخه‌ای  
محلول‌های قلیایی

**خلاصه:** با توجه به تأثیر مواد قلیایی بر ویژگی‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه‌ی سرباره، تأثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم و تأثیر نسبت وزنی هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته‌ی بتن ژئوپلیمری در این پژوهش بررسی شده است. بدین منظور شش طرح اختلاط در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان دادند، با کاهش نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم و افزایش غلظت هیدروکسید سدیم مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم و کاهش نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. بنابراین طرحی با نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم برابر ۰/۴ و غلظت ۶ مولار هیدروکسید سدیم به علت دارا بودن بیش‌ترین مقاومت فشاری به عنوان بهترین طرح در این پژوهش انتخاب شد. بررسی‌های انجام شده بر روی آثار زلزله‌های متعدد نشان داده است که اتصال‌های تیر به ستون بتنی در قاب‌های خمشی یکی از نقاط ضعیف و یکی از عوامل اصلی تخریب آن‌ها هستند. در مرحله‌ی دوم این پژوهش دو نمونه اتصال تیر به ستون یکی با بتن ژئوپلیمری با طرح بهینه و دیگری با بتن معمولی ساخته شد؛ سپس به منظور بررسی رفتار چرخه‌ای اتصال، آزمایش طبق پروتکل بارگذاری آیین‌نامه ACI 374.1-05 انجام گردید. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد اتصال تیر به ستون کناری با استفاده از بتن ژئوپلیمری، بر اساس معیارهای پذیرش آیین‌نامه‌ی ACI 374.1-05 رفتار مناسب و عملکرد لرزه‌ای رضایت‌بخشی به همراه تشکیل مفصل پلاستیک در تیر داشته است.

### ۱- مقدمه

بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، در پروژه‌های عمرانی جهان شناخته شده است. با توجه به میزان مصرف بالای بتن و نیاز روزافزون به تولید سیمان، توجه به اثرات مخرب زیست محیطی این ماده، از جمله سهم حدود ۷ درصدی انتشار گاز دی‌اکسید کربن در جو و مصرف قابل ملاحظه‌ی انرژی از قبیل برق و سوخت فسیلی، امری اجتناب‌ناپذیر است و ارائه محصولات جایگزین در مسیر توسعه‌ی پایدار، اصلی ضروری به شمار می‌آید. بتن ژئوپلیمری به عنوان یک راهکار علمی و عملی می‌تواند جایگزینی مناسب برای بتن حاوی سیمان‌های پرتلند باشد. برای تولید سیمان‌های ژئوپلیمری نیاز به مصرف انرژی کم‌تری بوده و انتشار گاز دی‌اکسید کربن نسبت به سیمان‌های پرتلند ۲۲ تا ۷۲ درصد کاهش می‌یابد. از این رو یکی از راه‌کارهای تولید بتنی سازگار با محیط زیست استفاده از چسباننده‌های پوزولانی و شبه سیمانی و کاهش مصرف سیمان‌های پرتلند

است [۱]. اصطلاح ژئوپلیمر برای اولین بار توسط دیویدویتس<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۹ معرفی شد [۲]. ژئوپلیمرها نوع جدیدی از مواد چسباننده جایگزین سیمان پرتلند هستند که از واکنش یک ماده آلومینوسیلیکاتی مانند سرباره با یک محلول قلیایی تولید می‌شوند و منجر به تولید نوعی بتن به نام بتن ژئوپلیمری شده‌اند. موقعیت مواد چسباننده در دیاگرام  $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$  در شکل ۱ نشان داده شده است. طبق این شکل، چسباننده‌ها بر اساس ماهیت اجزای چسباننده خود به مواد دارای کلسیم بالا مانند سرباره و مواد با کلسیم پایین مانند خاکستر بادی نوع  $F$  تقسیم‌بندی می‌شوند [۳].

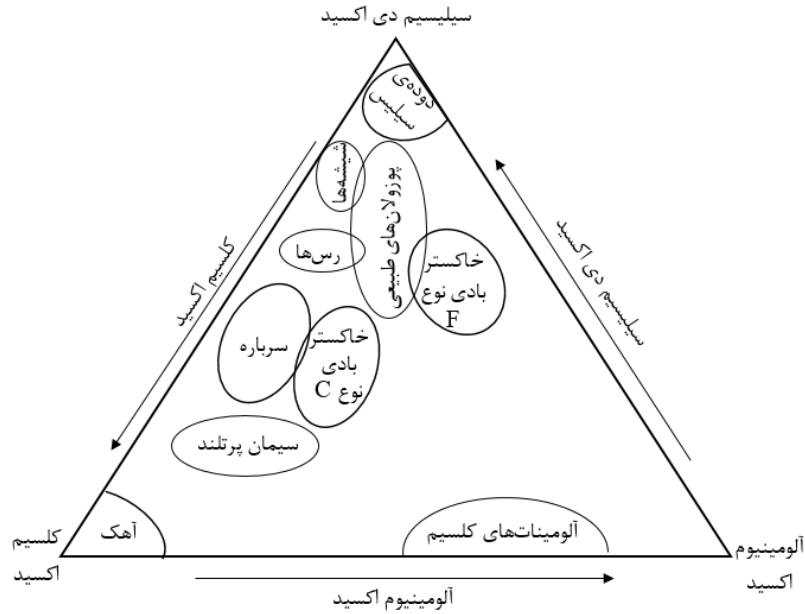
از جمله مزایای بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن پرتلند، مقاومت فشاری بالا، مقاومت بالاتر در برابر حملات شیمیایی و نفوذ یون کلرید، مقاومت در برابر چرخه‌های یخ و ذوب، مقاومت در برابر سایش به ویژه هنگام کاربرد پرکننده‌های پلی‌تترافلوئورو اتیلن (PTFE)، مقاومت در برابر حرارت و عدم انتشار بخار سمی، هدایت حرارتی کم، چسبندگی به سطوح بتنی قدیمی،

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: tajmir@eng.ui.ac.ir

1 Davidovits

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱. موقعیت مواد چسباننده در دیاگرام سه گانه‌ی آلومینیوم اکسید-سیلیسیم دی اکسید-کلسیم اکسید [۳]

Fig. 1. Position of adhesives in the triple diagram of aluminum oxide-silicon dioxide-calcium oxide

آلتان<sup>۱</sup> و اردوغان<sup>۲</sup> [۸] سه نوع فعال کننده‌ی قلیایی را در ملات قلیا فعال سرباره‌ای مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها در ملات‌های قلیا فعال سرباره‌ای که دارای سیلیکات سدیم هستند و در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تحت عمل‌آوری حرارتی قرار گرفته‌اند، محلول هیدروکسید پتاسیم از محلول هیدروکسید سدیم مؤثرتر است. هم‌چنین برای نمونه‌هایی که در دمای محیط عمل‌آوری می‌شوند استفاده از هیدروکسید پتاسیم فقط در چند هفته‌ی اول مقاومت بیش‌تری نسبت به هیدروکسید سدیم نتیجه می‌دهد و از آن به بعد، این روند برعکس می‌شود. هم‌چنین بر طبق گزارش آن‌ها برای نمونه‌هایی که در دمای محیط عمل‌آوری می‌شوند، محلول هیدروکسید سدیم بهتر از سیلیکات سدیم عمل می‌کند و آن نمونه‌ها مقاومت بیش‌تری را کسب می‌کنند؛ در حالی که وجود سیلیکات سدیم در عمل‌آوری حرارتی در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ضروری است و حتی به هیدروکسید سدیم برای کسب مقاومت نیازی نیست.

نجیمی و غفوری [۹] به بررسی اثر غلظت هیدروکسید سدیم، نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم و نسبت سرباره به پوزولان طبیعی بر روی خواص مهندسی بتن قلیا فعال سرباره‌ای پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها

تازه، فولاد و سرامیک، محافظت ذاتی از فولاد به دلیل  $pH$  باقی‌مانده‌ی بالا و نرخ انتشار پایین کلرید و از معایب آن گیرش بسیار سریع و از دست دادن سریع کارایی، افت خشک‌شدگی بالا و میزان بالای کربناسیون است [۴ و ۵].

از عوامل مؤثر بر ویژگی‌های این بتن می‌توان به نوع سرباره، نوع فعال کننده‌ی قلیایی، افزودنی‌ها و نحوه‌ی عمل‌آوری اشاره کرد. ترکیب شیمیایی سرباره به فرآیند ساخت فولاد به کار رفته و نوع فولاد ساخته شده بستگی دارد. سرباره شامل مجموعه‌ای از آنیون‌ها  $(MgO_4)^{6-}$ ،  $(AlO_4)^{5-}$  و  $(SiO_4)^{4-}$  و کاتیون‌ها  $(Mg^{2+}$ ،  $Al^{3+}$ ،  $Ca^{2+})$  است [۶]. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، برای اطمینان از هیدراسیون مناسب سرباره لازم است مدول هیدراسیون ( $HM$ ) که به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود بیش‌تر از ۱/۴ باشد [۷].

$$HM = \frac{(CaO + MgO + Al_2O_3)}{SiO_2} \quad (1)$$

1 Altan  
2 Erdoğan

و مقاومت خمشی  $IPC^3$  نسبت به مدل‌های ارائه شده توسط استانداردهای بتن بر پایه ی  $OPC^4$  بسیار مناسب بود. هم‌چنین مشخص شد اکثر خواص مکانیکی، مانند بتن سیمان پرتلند به طرح اختلاط و روش‌های مراقبت بستگی دارد.

مرنان<sup>۵</sup> و همکاران [۱۳] به بررسی تیرهای بتن ژئوپلیمری مسلح شده با میلگردهای پلیمر فیبر شیشه‌ای ( $GFRP$ )<sup>۶</sup> تحت آزمون خمشی استاتیکی چهار نقطه‌ای پرداختند. طبق گزارش آن‌ها تیرهای بتن ژئوپلیمری مسلح شده با پلیمرهای فیبر شیشه‌ای می‌توانند سیستم سازه‌ای را با دوام بالاتر، پایداری بالاتر و قدرت کافی بهبود ببخشند. هم‌چنین ظرفیت خمشی تیرهای آزمایش شده در این پژوهش بالاتر از تیرهای بتن معمولی تقویت شده با  $FRP^7$  در مطالعات قبلی آن‌ها بود.

داتاتریا<sup>۸</sup> و همکاران [۱۴] به بررسی رفتار اعضای خمشی بتن ژئوپلیمری تقویت شده که در دمای اتاق عمل‌آوری شدند، پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها در مجموع هجده تیر تحت آزمایش خمشی قرار گرفت. سه مخلوط بتن معمولی و شش مخلوط بتن ژئوپلیمری در محدوده‌ی مقاومت ۱۷ تا ۶۳ مگاپاسکال با داشتن ترکیب‌های مختلف خاکستر بادی و سرباره مورد بررسی قرار گرفت. تمام نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی دو نقطه‌ای آزمایش شدند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که ظرفیت تحمل بار تیرهای بتن ژئوپلیمری در بیش‌تر موارد بیش از تیرهای بتنی با سیمان پرتلند بود.

قبل از دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی، طراحی اتصال‌های تیر به ستون بتنی چندان مورد توجه پژوهشگران قرار نداشت. تصور طراحان این بود که اگر تنش‌های اعضای اتصال یعنی تیرها و ستون‌ها در حد مجاز قرار داشته باشند، ناحیه‌ی اتصال که عموماً از مقطع بزرگ‌تری نسبت به اعضاء برخوردار است، بحرانی نخواهد بود. اما بررسی‌های دقیق‌تر در محدوده‌ی هسته‌ی اتصال نشان دادند که این فرضیه صحیح نبوده و اتصال‌هایی که به این ترتیب طراحی می‌شدند اغلب ضعیف‌ترین قسمت سیستم باربری سازه را تشکیل می‌دادند [۱۵]. در زمان اعمال نیروهای زلزله، اتصال‌های تیر به ستون بتنی در قاب‌های خمشی تحت اثر تنش‌های برشی و پیوستگی شدید قرار می‌گیرند. از این‌رو لازم است تا ناحیه‌ی هسته‌ی اتصال به صورت کامل محصور شده و میلگردهای طولی تیر در این ناحیه دارای طول مهارتی کافی

نسبت مساوی از پوزولان طبیعی و سرباره منجر به بالاترین مقاومت فشاری شد. هم‌چنین در بتن قلیا فعال حاوی مقدار بیش‌تر سیلیکات سدیم، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. مقدار بهینه‌ی غلظت هیدروکسید سدیم، برای به دست آمدن بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری نیز با افزایش سهم سرباره در نسبت سرباره به پوزولان طبیعی، افزایش می‌یابد.

تقوایی و همکاران [۱۰] به بررسی اثر مدول سیلیکات سدیم (نسبت  $\frac{SiO_2}{Na_2O}$ ) و غلظت محلول قلیایی بر روی ویژگی‌های بتن قلیا فعال سرباره‌ای پرداختند. بر اساس نتایج پژوهش آن‌ها با افزایش غلظت محلول قلیایی و مدول سیلیکات سدیم، مقاومت فشاری، اسلامپ و میزان افت خشک شدگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد، اما زمان گیرش کاهش می‌یابد. شجاعی و بهرنیا [۱۱] به بررسی تأثیر نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم و هم‌چنین غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری و مدول گسیختگی بتن قلیا فعال سرباره‌ای پرداختند. در انجام پژوهش آن‌ها سه نسبت ۱، ۳ و ۵ و هم‌چنین سه غلظت ۴، ۶ و ۸ مولار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش غلظت از ۴ به ۶ مولار مدول گسیختگی و مقاومت فشاری در تمام سنین افزایش یافته و بعد از آن با افزایش بیش‌تر غلظت، مقاومت کاهش یافته است. هم‌چنین مقاومت فشاری و مدول گسیختگی با افزایش نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم، کاهش یافته است.

پژوهش‌های غیرسازه‌ای بر روی بتن ژئوپلیمری و به تبع آن کاربردهای این بتن در زمینه‌های غیرسازه‌ای به صورت فراوانی در سراسر دنیا گسترش یافته‌اند، اما پژوهش‌ها بر روی رفتار سازه‌ای این بتن به ویژه در ایران کم‌تر انجام شده است. در ادامه برخی از پژوهش‌ها در زمینه کاربرد سازه‌ای این بتن بیان شده است.

سوفی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۲] به محاسبه مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن پلیمری معدنی پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها ۶ طرح اختلاط از بتن پلیمری معدنی شامل ۹۰ نمونه استوانه‌ای و ۲۴ نمونه تیر کوچک مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج این مطالعه، چگالی بتن پلیمری معدنی مشابه بتن سیمان پرتلند بود. مقاومت فشاری در حدود ۱۰ تا ۱۵ مگاپاسکال برای هر یک از نمونه‌ها از ۷ روزه تا ۲۸ روزه افزایش یافت. افزایش مقاومت به دلیل این واقعیت بود که واکنش پلیمریزاسیون<sup>۲</sup> بعد از ۷ روز هم‌چنان ادامه داشت. مقاومت کششی

3 Inorganic polymer concrete

4 Ordinary Portland cement

5 Maranan

6 Glass-fibre-reinforced polymer

7 Fibre-reinforced polymer

8 Dattatreya

1 Sofi

2 Polymerization

باشند.

از حدود سال‌های ۱۹۷۰ میلادی، آیین‌نامه‌های طراحی فعالیت زیادی در زمینه‌ی تدوین ضوابط طراحی اتصال‌ها آغاز نمودند. با این وجود، هنوز در بسیاری از نقاط جهان به علت عدم اجرای ضوابط یاد شده، اتصال‌های تیر به ستون در قاب‌های بتنی عامل اصلی تخریب سازه‌ها هستند [۱۶].

آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا 'ACI 352-76' [۱۷] اولین بار در سال ۱۹۷۶ ضوابط استاندارد برای طراحی اتصال‌ها را ارائه نمود. در این آیین‌نامه شرایط تغییر شکل‌های غیرالاستیک پیش‌بینی نشده و به طور کلی، شکل‌پذیری اتصال‌ها مورد توجه قرار نگرفته بود. آنچه اساس ضوابط ارائه شده را تشکیل می‌داد، مفهوم تیر ضعیف-ستون قوی در طراحی اتصال‌های تیر به ستون بتنی بود. اتصال‌های طراحی شده با آیین‌نامه‌ی ACI 352-76 لزوماً باید در محدوده‌ی الاستیک بارگذاری گردند و از این‌رو، بارهای چرخه‌ای ناشی از زلزله و تنش‌های برشی شدید در ناحیه‌ی هسته‌ی اتصال باعث افت قابل توجهی در سختی آن‌ها شده و تخریب آن‌ها را در پی خواهد داشت. خسارت‌های ایجاد شده در اتصال‌ها در اثر بارهای چرخه‌ای یکی از عواملی بودند که موجب تدوین ضوابط جدید در آیین‌نامه‌های طراحی گردیدند.

در آخرین دستورالعمل ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا ACI 352-R 02 [۱۸] برای اتصال‌های بتنی، امکان تغییر شکل‌های غیرالاستیک در ناحیه‌ی اتصال پیش‌بینی شده است. اتصال‌هایی که با ضوابط این آیین‌نامه طراحی شده باشند دارای مقاومت لازم در برابر بارهای ثقلی، بارهای زلزله و اثرات متقابل نیروهای حاصل از اعضای متصل به اتصال که از جهت‌های مختلف به آن وارد می‌شوند، هستند.

در یک اتصال تیر به ستون بتنی، تخریب تیر از اهمیت کم‌تری نسبت به تخریب ستون برخوردار است. به همین ترتیب، اهمیت تخریب ستون به مراتب از اهمیت تخریب هسته‌ی اتصال کم‌تر بوده و به آن اندازه بحرانی نیست. ایجاد مفصل خمیری در ناحیه‌ی هسته‌ی اتصال موجب دوران شدید تیر و ستون و کاهش چشم‌گیر ظرفیت باربری ستون خواهد شد. این مکانیزم شکست بسیار خطرناک بوده و ضوابط طراحی باید به گونه‌ای تدوین شوند که چنین مکانیزمی در اتصال به وجود نیاید.

دیهه راج<sup>۲</sup> و همکاران [۱۹] به بررسی اتصال‌های ژئوپلیمری بر پایه‌ی خاکستر بادی تحت بار سیکلی پرداختند. آن‌ها یک نمونه اتصال نیز با استفاده از بتن معمولی ساختند؛ هم‌چنین دو نمونه‌ی دیگر از بتن ژئوپلیمری

1 American Concrete Institute

2 Deepa Raj

و بتن معمولی به همراه ۰/۵ درصد حجمی از الیاف فولادی قلاب‌دار را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با استفاده از نتایج آزمایشات، بار لازم برای ایجاد اولین ترک، بار نهایی، ظرفیت جذب انرژی و اتلاف انرژی را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد مقاومت و رفتار اتصال بتن ژئوپلیمری بدون الیاف و با الیاف بهتر از رفتار اتصال بتن معمولی است. هم‌چنین نمونه بتن ژئوپلیمری رفتار با انعطاف‌پذیری بیش‌تری را از خود نشان داد.

سرانیان<sup>۳</sup> و همکاران [۲۰] به بررسی عملکرد اتصال‌های تیر به ستون بتن ژئوپلیمری تهیه شده از سرباره و دولومیت تحت بار یکنواخت پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها حداکثر مقاومت فشاری در نسبت ۳۰ درصد دولومیت و ۷۰ درصد سرباره به دست آمد. هم‌چنین برای بررسی عملکرد الیاف فولادی در بتن اتصال‌ها، الیاف فولادی به میزان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد از حجم بتن به بتن افزوده شد. بر اساس نتایج آن‌ها حداکثر مقاومت فشاری در نسبت ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی به دست آمد. آن‌ها به بررسی پارامترهایی از قبیل بار نهایی، ظرفیت جذب انرژی، شکل‌پذیری و رفتار ترک بتن ژئوپلیمر تقویت شده با الیاف و بتن ژئوپلیمر بدون الیاف پرداختند. آن‌ها رفتار شکل‌پذیرتر، جذب انرژی و چقرمگی بالاتر را در نمونه‌هایی که به آن‌ها الیاف فولادی افزوده شده بود، مشاهده کردند.

داتا<sup>۴</sup> و پرمکومار<sup>۵</sup> [۲۱] اتصال تیر به ستون با استفاده از بتن ژئوپلیمری بر پایه‌ی مخلوطی از خاکستر بادی و سرباره و با الیاف و بدون الیاف فولادی را مورد مطالعه قرار دادند و با اتصال بتنی با استفاده از سیمان پرتلند با الیاف و بدون الیاف مورد مقایسه قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف فولادی دارای بیش‌ترین ظرفیت انتقال بار است.

نات<sup>۶</sup> و لوکشواران<sup>۷</sup> [۲۲] به بررسی رفتار اتصال‌های تیر به ستون بتنی با استفاده از بتن ژئوپلیمری با و بدون الیاف فولادی پرداختند و نتایج حاصل را با نتایج حاصل از اتصال با استفاده از بتن معمولی با و بدون استفاده از الیاف فولادی مقایسه کردند. الیاف فولادی به میزان ۰/۷۵ درصد حجمی به کار برده شد و برای ارزیابی اتصال‌ها، آن‌ها را تحت بارگذاری نیمه چرخه‌ای قرار دادند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد ظرفیت اتلاف انرژی و ضریب انعطاف‌پذیری اتصال‌های تیر به ستون بتن ژئوپلیمری با و بدون الیاف بیش‌تر از اتصال‌های تیر به ستون بتن معمولی با و بدون الیاف است.

3 Saranya

4 Datta

5 Premkumar

6 Nath

7 Lokeshwaran

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سرباره‌ی کوره‌ی بلند ذوب آهن اصفهان بر حسب درصد

Table 1. Chemical composition of Isfahan Steel blast furnace slag in percentage

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$CaO$	$Fe_2O_3$	$MgO$	قلیایی‌ها
۳۵/۵	۹/۵	۳۶	۰/۵	۹/۵	۰/۸

۲- به دست آوردن ویژگی‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری

۲-۱- مصالح مصرفی

مصالح مصرفی مورد استفاده برای ساختن بتن ژئوپلیمری در این پژوهش عبارتند از: مصالح سنگی (ماسه و شن)، سرباره، هیدروکسید سدیم (یا سود سوزآور با فرمول شیمیایی  $NaOH$ ) که به منظور اختصار در متن با عنوان سود آورده می‌شود، سیلیکات سدیم، آب و فوق روان کننده. ماسه‌ی مصرفی ماسه‌ی رودخانه‌ای با اندازه‌ی ۰ تا ۴/۷۵ و مدول نرمی برابر ۲/۸۱ بود که مدول نرمی و دانه‌بندی آن در محدوده‌ی مجاز استاندارد ۳۰۲ [۲۴] قرار داشت. سنگ‌دانه‌های شکسته با اندازه‌های ۴/۷۵ تا ۱۲ میلی‌متر و ۱۲ تا ۱۹ میلی‌متر استفاده شده نیز دارای دانه‌بندی در محدوده مجاز استاندارد ۳۰۲ هستند، البته به علت این که محدوده مجاز ۱۲ تا ۱۹ میلی‌متر برای شن در استاندارد ۳۰۲ تعریف نشده است، از نزدیک‌ترین محدوده به آن یعنی محدوده مجاز برای شن ۹/۵ تا ۱۹ میلی‌متر برای آن استفاده شده است. ماده‌ی اصلی چسباننده در ترکیب بتن ژئوپلیمری سرباره است. سرباره‌ی استفاده شده سرباره‌ی کوره بلند کارخانه ذوب آهن اصفهان است. در جدول ۱ نتیجه‌ی آنالیز شیمیایی سرباره‌ی مورد استفاده آورده شده است. سطح مخصوص آن حدود  $4000 \text{ cm}^2 / \text{g}$  و وزن مخصوص آن  $\text{g} / \text{cm}^3$  ۲/۷۵ است. هیدروکسید سدیم جامد با خلوص ۰/۹۸ و سیلیکات سدیم مایع شامل ۴۸٪ آب به عنوان فعال‌ساز استفاده شد.

۲-۲- طرح‌های اختلاط

از آنجایی که بتن ژئوپلیمری مصالح ساختمانی است که اخیراً توسعه یافته است، در حال حاضر روش استاندارد برای طرح اختلاط آن در دسترس نیست؛ بنابراین روش طرح اختلاط نویسی در این پژوهش طبق روش ارائه شده توسط ناوی [۳] است. بر این اساس جرم واحد حجم بتن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. درصد وزنی سنگ‌دانه ۰/۷۵ از کل بتن را تشکیل دادند. درصد وزنی ریزدانه ۰/۵۸ و درشت دانه ۰/۴۲ از کل سنگ‌دانه

هم‌چنین دریافتند، ظرفیت تحمل بار در اولین ترک نمونه‌های با الیاف بیش‌تر از نمونه‌های بدون الیاف است.

از آن‌جا که تولید سیمان پرتلند دارای مشکلات زیست محیطی زیادی است، در نتیجه انتخاب جایگزینی مناسب برای آن در صنعت همواره مورد پژوهش بوده است. بتن ژئوپلیمری می‌تواند به علت استفاده از محصول‌های جانبی<sup>۱</sup> تولیدی کارخانه‌ها موجب حفظ محیط زیست گردد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد استفاده از این بتن در اجزای سازه‌های کم‌تر مورد مطالعه قرار گرفته است. هم‌چنین از آنجایی که در اکثر کشورهای دنیا خاکستر بادی بیش‌تر به عنوان یک محصول جانبی کارخانه‌ها یافت می‌شود، مطالعات صورت گرفته بتن ژئوپلیمری نیز بیش‌تر بر پایه‌ی خاکستر بادی است؛ هم‌چنین از آنجایی که نوع کوره و نوع فولاد در ترکیبات تشکیل دهنده‌ی سرباره مؤثر است؛ لزوم بررسی رفتار اتصال خمشی تیر به ستون با استفاده از بتن ژئوپلیمری بر پایه‌ی سرباره و به ویژه سرباره‌ای که از محصولات جانبی کارخانه‌های داخل کشور ایران است و به فراوانی و با قیمت مناسب یافت می‌شود، بیش‌تر مشخص می‌شود. لازم به ذکر است تاکنون مطالعه مشابهی در کشور جهت کاربرد بتن ژئوپلیمری در رفتار اعضای سازه‌ای انجام نشده است. برای این منظور در این مقاله ابتدا شش طرح اختلاط از بتن ژئوپلیمری تهیه شده است. سپس به انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تعیین مدول الاستیسیته بر روی نمونه‌های استوانه‌ای پرداخته شده است؛ بعد از انجام آزمایش‌های بیان شده بهترین طرح برای ساختن اتصال انتخاب شده است و نهایتاً اتصال تیر به ستون بتن ژئوپلیمری ساخته شده است. آزمایش بر روی نمونه‌ی اتصال طبق پروتکل بارگذاری آیین‌نامه  $ACI 374.1-05$  [۲۳] انجام شده است.

جدول ۲. طرح‌های اختلاط انتخاب شده

Table 2. Selected mixing designs

نام طرح	غلظت محلول هیدروکسید سدیم Molarity	نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم	سرباره $kg / m^3$	محلول هیدروکسید سدیم $kg / m^3$	سیلیکات سدیم $kg / m^3$	آب افزوده شده $kg / m^3$	روان کننده $kg / m^3$
۱	۴	۳	۳۸۸/۳	۱۳۱/۵	۴۳/۸۳	۳۶/۹	۳/۸۸
۲	۴	۱	۳۷۵/۵	۸۴/۵	۸۴/۵	۵۵/۵	۳/۷۵
۳	۴	۰/۴	۳۶۵	۴۷/۵	۱۱۷	۷۱/۷۶	۳/۶۵
۴	۶	۳	۳۸۰	۱۲۸	۴۲/۷۵	۴۸	۳/۸
۵	۶	۱	۳۷۱	۸۳/۵	۸۳/۵	۶۲/۳	۳/۷
۶	۶	۰/۴	۳۶۴	۴۷/۳	۱۱۶/۵	۷۲/۸	۳/۶۴

در حد بهینه تنظیم گردد تا بهترین ویژگی‌های مکانیکی حاصل آید، بنابراین در این بخش، نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر ارائه شده‌اند.

۲-۴-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

جهت ارزیابی مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، در هر سن و برای هر طرح، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین سه نمونه در هر سن به دست آمد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در جدول ۳ نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر غلظت هیدروکسید سدیم، نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم ثابت نگه داشته شده است. پس برای بررسی تأثیر غلظت هیدروکسید سدیم طرح‌های ۱ و ۴ با هم، طرح‌های ۲ و ۵ با هم و طرح‌های ۳ و ۶ نیز با هم مقایسه می‌شوند.

با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه و برای هر سه نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم افزایش یافته است. علت این امر افزایش میزان سود در محلول است. افزایش میزان سود در محلول موجب یونیزه شدن بیش‌تر ترکیبات سرباره و افزایش تبلور محصولات واکنش سرباره با محلول قلیایی می‌شود؛ با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، حلالیت آنیون‌ها (سیلیکات و آلومینات) و کاتیون‌های (کلسیم) سرباره افزایش پیدا می‌کند. ساختار تشکیل شده در این حالت به دلیل واکنش‌های کامل‌تری که صورت می‌گیرد، بهتر است و سرعت شکل‌گیری محصولات واکنش بیش‌تر می‌گردد.

را تشکیل دادند. نسبت محلول قلیایی به سرباره ۰/۴۵، نسبت آب به مواد جامد ۰/۴، نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم در سه مقدار ۳، ۱ و ۰/۴ و هیدروکسید سدیم در دو غلظت ۴ و ۶ مولار در نظر گرفته شدند. روان کننده نیز از نوع پلی کربکسیلات به میزان ۱ درصد وزن سرباره به کار رفت. ترکیب شش طرح اختلاط در جدول ۲ نشان داده شده است.

۲-۳- روش انجام آزمایش‌ها

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری طبق استاندارد *ASTM C 39* [۲۵] نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۳۰۰ و قطر ۱۵۰ میلی‌متر تهیه گردیدند. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای آزمایشگاه از قالب خارج شدند و تا زمان آزمایش داخل آب نگهداری شدند. هم‌چنین برای اندازه‌گیری مقاومت کششی از روش پیشنهادی استاندارد *ASTM C 496* [۲۶] به روش دو نیم شدن استفاده شد. آزمایش تعیین مدول الاستیسیته نیز طبق استاندارد *ASTM C 469* [۲۷] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۳۰۰ و قطر ۱۵۰ میلی‌متر انجام گردید.

۲-۴- نتایج

لازم به ذکر است راجع به تأثیر در مقدارهای محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم نمی‌توان با قاطعیت صحبت نمود و نسبت این مواد بایستی

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

Table 3. Compressive strength test results

شماره‌ی طرح	مقاومت فشاری (MPa)				
	درصد مقاومت فشاری	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه از ۹۰ روزه
۱	۲۴/۲	۳۷/۱۷	۳۹/۹	۶۰/۶	۹۳
۲	۲۳/۱	۴۰/۶	۴۴/۲	۵۲/۳	۹۱
۳	۱۹/۵	۳۵/۸	۴۷/۷	۴۰/۸	۷۵
۴	۲۵/۳	۳۹/۶	۴۲/۲	۶۰	۹۳/۸
۵	۲۳/۷	۴۳/۵	۴۶/۳	۵۱	۹۳/۵
۶	۲۴/۶	۴۸/۳	۵۶/۷	۴۳/۳	۸۵

جدول ۴. تأثیر افزایش غلظت هیدروکسید سدیم بر افزایش مقاومت فشاری

Table 4. The effect of increasing the concentration of sodium hydroxide on the compressive strength

مقایسه بین طرح‌های x و y	نسبت وزنی هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم	درصد افزایش مقاومت فشاری y از x		
		۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
۱ و ۴	۳	۴/۵	۶/۵	۵/۷
۲ و ۵	۱	۲/۴	۷/۱	۴/۷
۳ و ۶	۰/۴	۲۶	۳۴/۹	۱۸/۸

کمترین درصد از مقاومت ۹۰ روزه‌ی خود را در سن ۷ روز کسب کرده‌اند. برای بررسی تأثیر نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم، غلظت هیدروکسید سدیم ثابت نگه داشته شده است. پس برای بررسی تأثیر نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم، طرح‌های ۱، ۲ و ۳ با هم و طرح‌های ۴، ۵ و ۶ نیز با هم مقایسه می‌شوند. طبق جدول ۳، در غلظت ۶ مولار هیدروکسید سدیم یعنی در طرح‌های ۴، ۵ و ۶ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، کاهش نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم موجب افزایش مقاومت فشاری و در غلظت ۴ مولار یعنی در طرح‌های ۱، ۲ و ۳ نیز کاهش نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم در سن ۹۰ روز موجب افزایش مقاومت فشاری بتن گردیده است. علت کاهش مقاومت فشاری در سن ۷ روز برای غلظت ۶ مولار و در سنین ۷ و ۲۸ روز در غلظت ۴ مولار هیدروکسید سدیم با وجود کاهش

بیشترین تأثیر افزایش مقاومت فشاری به علت افزایش غلظت هیدروکسید سدیم در نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم برابر ۰/۴ مشاهده گردید. به عبارت دیگر در طرح‌های ۳ و ۶ بیشترین مقاومت فشاری در هر دو غلظت هیدروکسید سدیم مشاهده شد. روند رشد مقاومت فشاری در سنین اولیه در این نسبت وزنی آهسته‌تر از نسبت‌های دیگر است که علت این امر کم‌تر بودن میزان سود در محلول است. در جدول ۴ درصد افزایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم در سه نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم نشان داده شده است.

درصد مقاومت فشاری ۷ از ۹۰ روزه و درصد مقاومت فشاری ۲۸ از ۹۰ روزه طرح‌های ۱ تا ۶ در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد طرح‌های ۳ و ۶ که کمترین نسبت وزنی سود را دارا هستند،

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی ۲۸ روزه

Table 5. Results of 28-day tensile strength test

شماره‌ی طرح	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مقاومت کششی (MPa)	۳/۱	۳/۳۵	۲/۹	۳/۳	۳/۷	۴

جدول ۶. نتایج آزمایش تعیین مدول الاستیسیته

Table 6. Test results to determine the modulus of elasticity

شماره‌ی طرح	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۳	۲۰	۱۹	۲۱	۱۸	۱۶

کم‌تر بودن سود در طرح و در نتیجه پایین بودن سرعت گیرش بتن است.

۲-۴-۳- نتایج آزمایش تعیین مدول الاستیسیته

برای تعیین مدول الاستیسیته نیز برای هر طرح سه نمونه در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت و اعداد نشان داده شده در جدول ۶، میانگین سه نمونه را نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات آزمایش، با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم و کاهش نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم، مدول الاستیسیته کاهش یافته است. همچنین ارتباط بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته با توجه به پراکندگی نتایج و محدودیت تعداد نمونه‌های این پژوهش قابل ارزیابی نیست. البته این ارتباط در اکثر موارد با تحقیقات محققین گذشته نظیر سوفی و همکاران [۱۲] تطابق دارد. بر اساس مشاهدات آزمایش طرح اختلاط ششم به علت دارا بودن سیلیکات سدیم بیش‌تر دارای بیش‌ترین مقاومت فشاری ۹۰ و ۲۸ روزه و بیش‌ترین مقاومت کششی است؛ همچنین بر اساس مشاهدات در هنگام ساختن نمونه‌ها، این طرح در مدت زمان طولانی‌تری کارایی خود را حفظ نمود. ضمن این‌که به دلیل کم‌تر بودن مقدار هیدروکسید سدیم در آن، گیرش اولیه‌ی دیرتری نیز در آن اتفاق افتاد. همچنین از آنجایی که سیلیکات سدیم نسبت به هیدروکسید سدیم قیمت پایین‌تری دارد؛ طرح ششم به عنوان طرح بهینه انتخاب گردید.

نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم از آن جهت است که وجود بیش‌تر سود در بتن موجب افزایش سرعت یونیزه شدن ترکیبات سرباره گردیده و سرعت واکنش سرباره با محلول قلیایی بیش‌تر گردیده و در نتیجه محصولات واکنش بیش‌تر گردیده‌اند؛ ولی به تدریج و شکل‌گیری هر چه بیش‌تر ژل C-A-S-H در ساختار بتن، مقاومت بتن در سنین بالاتر با روند کاهش نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم، افزایش پیدا کرده است.

۲-۴-۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی

در سن ۲۸ روز برای هر طرح سه نمونه مورد آزمایش کششی قرار گرفت و اعداد نشان داده شده در جدول ۵، میانگین سه نمونه را نشان می‌دهد. همان رابطه‌ای که برای مقاومت فشاری و میزان سود و سیلیکات سدیم مشاهده گردید، برای مقاومت کششی نیز مشاهده گردید. به نحوی که در یک طرح یکسان با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم که به معنای افزایش میزان سود در بتن است، مقاومت کششی افزایش یافته است. همچنین مقاومت کششی طرح‌های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب بیش‌تر از مقاومت کششی طرح‌های ۱، ۲ و ۳ هستند. همچنین در یک طرح یکسان با کاهش نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم مقاومت کششی افزایش یافته است. به استثنای طرح ۳ که علت این امر پایین بودن مقدار یون‌های  $OH^-$  و



جدول ۷. مشخصات مکانیکی بتن نمونه‌های اتصال

Table 7. Mechanical properties of concrete connection specimens

نام نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
بتن ژئوپلیمری	۲۷	۴۰	۳/۹	۱۴
بتن معمولی	۳۶	۴۰	۴/۱	۲۴

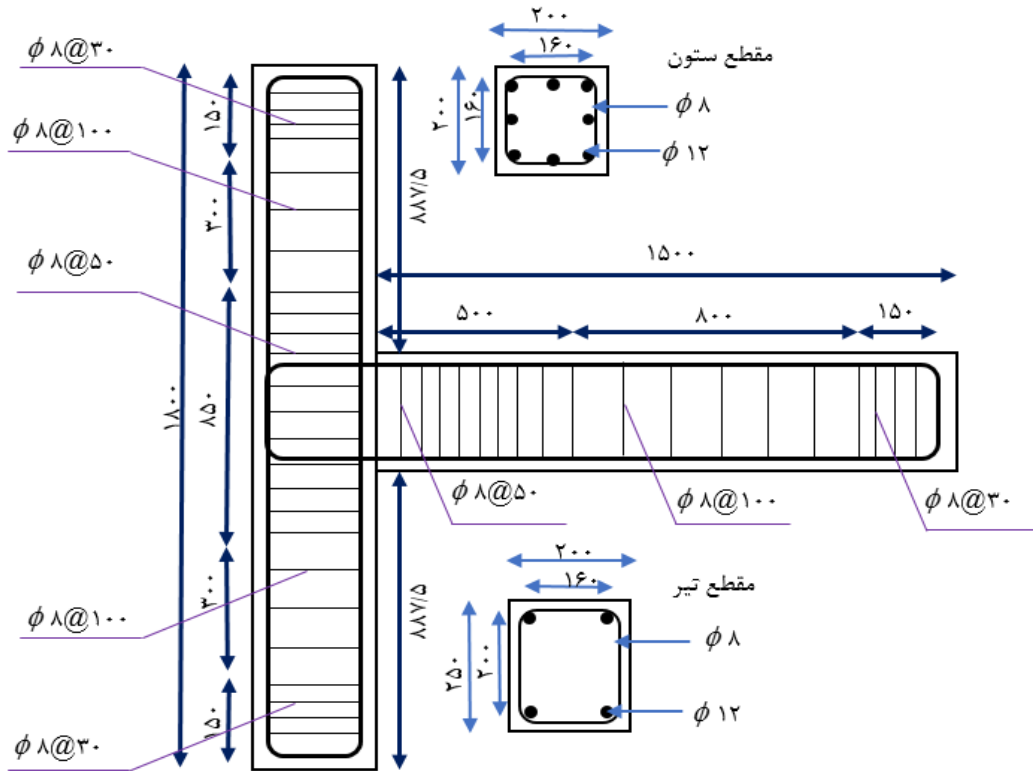
۳- کاربرد بتن ژئوپلیمری در اتصال تیر به ستون

۳-۱- مشخصات نمونه‌های اتصال و مصالح

به منظور بررسی کاربرد بتن ژئوپلیمری در اتصال تیر به ستون، لازم است تا نمونه‌ای مورد آزمایش قرار گیرد. برای رسیدن به این هدف یک قاب خمشی بتن آرمه‌ی دو طبقه با شکل‌پذیری متوسط و کاربری اداری، بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا *ACI 318-14* [۲۸] در نرم‌افزار *ETABS 2000* بارگذاری، تحلیل و طراحی شد. ارتفاع هر طبقه ۳ متر و دهانه‌ی تیرها ۵/۶ متر است. این قاب دارای دو دهانه‌ی یکسان و دو طبقه است. نمونه‌ی اتصال، اتصال بیرونی از این قاب در منطقه‌ای با خطرپذیری متوسط و تیپ خاک ۳ است. اتصال کناری به صورت نیم مقیاس مورد آزمایش قرار گرفته است. نمونه شامل هسته‌ی اتصال، نصف طول دهانه‌ی تیر و نصف ارتفاع ستون در دو سمت هسته‌ی اتصال است؛ که در واقع نقاط میانی تیر و ستون، محل نقطه‌ی عطف لنگر خمشی در قاب تحت اثر بار جانبی است. در شکل ۲ جزئیات آرماتورگذاری نمونه نشان داده شده است. طبق این شکل، عرض و ارتفاع مقطع تیر به ترتیب ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر و ستون به شکل مربع و با ابعاد ۲۰۰ میلی‌متر است. ۲ عدد آرماتور به قطر ۱۲ میلی‌متر به عنوان فولاد طولی فوقانی و تحتانی تیر و به صورت سراسری اجرا گردید. این مقدار فولاد محدودیت بیشینه و کمینه فولاد را نیز برآورده می‌سازد. مقدار فولاد طولی ستون نیز ۸ عدد آرماتور با قطر ۱۲ میلی‌متر و با توجه به فلسفه‌ی تیر ضعیف-ستون قوی در نظر گرفته شده است. این مقدار آرماتور طولی سبب می‌شود که مجموع ظرفیت خمشی ستون به تیر به مراتب بیش‌تر از ۱/۲ گردد؛ میزان فولاد عرضی قرار داده شده در تیر و ستون به حدی است که در

نمونه شکست برشی اتفاق نیفتد.

همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، طرح اختلاط ششم که در بخش قبلی معرفی شد به علت داشتن بهترین کارایی و بیش‌ترین مقاومت فشاری برای ساختن اتصال انتخاب شد؛ اما درشت‌دانه مورد استفاده در آن در محدوده ۵ تا ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا اجرای اتصال تسهیل شود. لازم به ذکر است با توجه به اینکه زمان گیرش در برخی از این بتن‌ها کنترل شده نیست و می‌تواند سبب افت سریع کارایی گردد، لازم است تا پس از اختلاط مناسب بتن، اجرای بتن با سرعت بالایی انجام شود. به منظور بررسی رفتار اتصال با بتن ژئوپلیمری لازم است تا رفتار اتصال با بتن معمولی نیز مورد بررسی و مقایسه گیرد. بنابراین یک نمونه اتصال نیز با استفاده از بتن معمولی ساخته شد. جزئیات آرماتورگذاری نمونه با بتن معمولی نیز مطابق با نمونه با بتن ژئوپلیمری است. برای اتصال تیر به ستون بتنی با سیمان پرتلند از بتن آماده با نسبت آب به سیمان ۰/۵، سیمان تیپ ۲ با عیار  $kg/m^3$  ۴۵۰، سنگ‌دانه‌ی درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب با نسبت اختلاط وزنی  $kg/m^3$  ۴۵۰ و  $kg/m^3$  ۱۲۰۰ استفاده شد. برای دست‌یابی به اسلامپ مناسب، فوق‌روان‌کننده با پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات در طرح اختلاط به کار گرفته شد و اسلامپ بتن پس از افزودن فوق‌روان‌کننده تا حد ۱۶۰ میلی‌متر افزایش یافت. پس از بتن‌ریزی، نمونه‌ها به مدت دو روز در قالب اتصال باقی ماندند. در این مدت سطح آزاد نمونه‌ها مرطوب نگاه داشته شد. پس از باز کردن قالب‌ها، عمل‌آوری نمونه‌های اتصال با مرطوب نگاه داشتن سطح بتن از طریق آب‌پاشی و هم‌چنین پوشش نایلونی انجام گردید. در جدول ۷ مشخصات مکانیکی بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی اتصال آورده شده است. لازم به ذکر است هر کدام از اعداد نشان داده شده در جدول



شکل ۲. مشخصات هندسی و جزئیات آرماتور گذاری نمونه اتصال (کلیدی ابعاد بر حسب میلی‌متر)

Fig. 2. Geometric specifications and reinforcement details of the connection specimen (all dimensions are in millimeters)

جدول ۸. مشخصات مکانیکی میلگرد طولی

Table 8. Mechanical specifications of longitudinal rebars

تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (GPa)
۴۷۰	۶۹۶	۱۶	۲۰۱

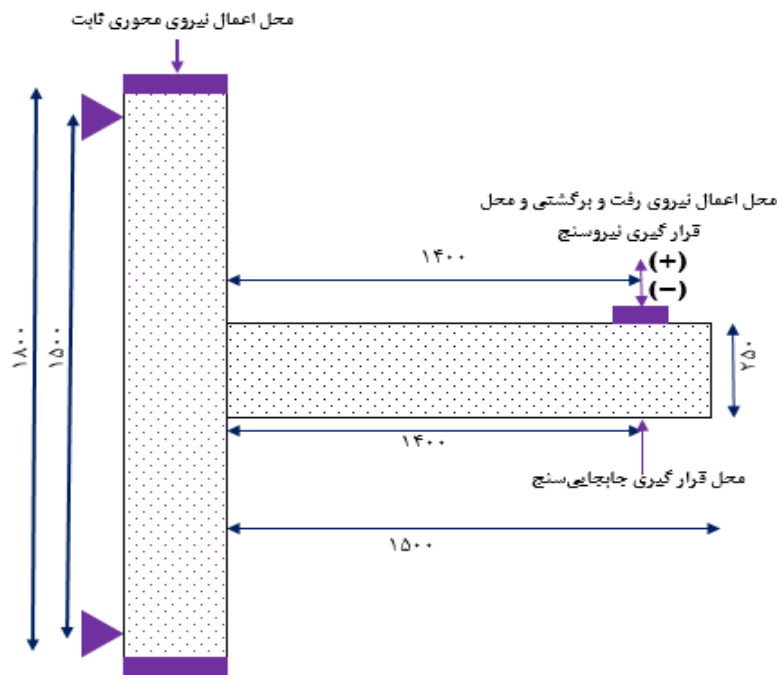
۳-۲- شرایط تکیه‌گاهی و نحوه‌ی انجام آزمایش

آزمایش در آزمایشگاه سازه‌ی دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل دانشگاه اصفهان انجام شد. ستون در هر دو انتها با اتصالاتی با عملکرد مفصلی در قاب صلب مهار شده است. ابتدای تیر نیز توسط یک اتصال مفصلی

میانگین ۳ نمونه را در هر آزمایش نشان می‌دهند. مشخصات مکانیکی میلگرد طولی نیز با انجام آزمایش کشش ساده تعیین و نتایج حاصل از آن شامل تنش تسلیم، تنش نهایی، کرنش نهایی و مدول الاستیسیته در جدول ۸ خلاصه شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳. نحوه‌ی پیکربندی آزمایش الف-نمای واقعی ب- نمای شماتیک (کلیه‌ی ابعاد بر حسب میلی‌متر)

Fig. 3. How to configure the experiment a- Real view b- Schematic view (all dimensions are in millimeters)

هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن و کورس ۴۰۰ میلی‌متر به ابتدای تیر اعمال شده است. تاریخچه‌ی بارگذاری به کار گرفته شده در این پژوهش طبق پروتکل بارگذاری آیین‌نامه  $ACI\ 374.1-05$  است. بار محوری ثابتی به میزان  $0.1f'_cA_g$  که تقریباً معادل ۱۶۰ کیلو نیوتن است، در طول آزمایش به ستون اعمال شده است.

به جک هیدرولیکی رفت و برگشتی متصل بوده است. بنابراین، ابتدای تیر و بالا و پایین ستون همگی در صفحه‌ی بارگذاری قابلیت دوران داشته‌اند، تا نقاط عطف یک قاب خمشی تحت بارگذاری جانبی زلزله را شبیه‌سازی کنند. نحوه‌ی پیکربندی آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. بار محوری رفت و برگشتی به شکل استاتیکی، موازی محور طولی ستون توسط یک جک



شکل ۴. الف. نمونه اتصال بتن ژئوپلیمری در انتهای تغییر مکان جانبی نسبی ۴٪. ب. نمونه اتصال بتن معمولی در انتهای تغییر مکان جانبی نسبی ۲/۷۵٪

Fig. 4. A- Specimen of geopolymer concrete connection at the end of 4% lateral drift ratio B- Specimen of ordinary concrete connection at the end of 2.75% lateral drift ratio

### ۳-۳ نتایج

در نمونه اتصال با استفاده از بتن ژئوپلیمری، اولین ترک‌های خمشی در تیر و در مجاورت ستون در تغییر مکان جانبی نسبی ۱٪ ایجاد شدند. با ادامه روند بارگذاری و افزایش دامنه‌ی سیکل‌های جابجایی، ترک‌های خمشی و خمشی-برشی در تیر افزایش یافتند. از تغییر مکان جانبی نسبی ۱/۴٪ ترک‌های مویین برشی در هسته‌ی اتصال پدیدار شدند، اما در طول بارگذاری افزایش عرض قابل توجهی نداشتند. اولین ترک خمشی ایجاد شده در تیر بیش‌ترین عرض را در طول زمان بارگذاری داشت. در شکل ۴-الف نمایی از ترک خوردگی اتصال در تغییر مکان جانبی نسبی ۴٪ نشان داده شده است. خرد شدن بتن تیر در مجاورت ستون طبق این شکل در تغییر مکان جانبی نسبی ۴٪ مشاهده شد. شکست این نمونه به صورت کاملاً خمشی و شکل‌پذیر بوده و مفصل پلاستیک در مجاورت ستون در طول حدود نصف عمق تیر در تیر تشکیل شد. بر اساس جدول ۹ بیشینه لنگر تیر ( $M_{peak}$ ) که در طول آزمایش به دست آمد، حدود ۷۴٪ بزرگ‌تر از مقاومت خمشی اسمی ( $M_n$ ) محاسبه شده بر اساس  $ACI 318-14$  [۲۸]، با استفاده از خصوصیات اندازه‌گیری شده‌ی مصالح بود که تأیید کننده‌ی ایجاد مفصل پلاستیک در تیر است. در جدول بیان شده‌ی اخیر  $\delta_{peak}$  جابجایی نسبی متناظر با لنگر بیشینه و  $\delta$  جابجایی نسبی است. همچنین به دلیل

تأمین خاموت در هسته‌ی اتصال، تنها ترک‌های مویین در هسته ایجاد شدند. در این جدول علامت + و - بیانگر جهت مثبت و منفی بارگذاری طبق شکل ۵ هستند.

در نمونه اتصال با استفاده از بتن معمولی، اولین ترک به صورت خمشی در تیر در مجاورت با ستون در تغییر مکان جانبی نسبی ۰/۲٪ ایجاد شد. با ادامه روند بارگذاری و افزایش دامنه‌ی سیکل‌های جابجایی، ترک‌های خمشی و خمشی-برشی در تیر افزایش یافتند. از تغییر مکان جانبی نسبی ۱٪ ترک‌های برشی در هسته اتصال پدیدار شدند، اما در طول بارگذاری افزایش عرض قابل توجهی نداشتند. اولین ترک خمشی ایجاد شده در تیر در بر اتصال بیش‌ترین عرض را در طول زمان بارگذاری داشت. خرد شدن بتن در مجاورت ستون طبق شکل ۴-ب در تغییر مکان جانبی نسبی ۲/۷۵٪ مشاهده شد. در این نمونه نیز بر اساس جدول ۹ بیشینه لنگر تیر ( $M_{peak}$ ) که در طول آزمایش به دست آمد، حدود ۶۷٪ بزرگ‌تر از مقاومت خمشی اسمی ( $M_n$ ) محاسبه شده بر اساس  $ACI 318-14$ ، با استفاده از خصوصیات اندازه‌گیری شده‌ی مصالح بود که تأیید کننده‌ی ایجاد مفصل پلاستیک در تیر است.

طول مفصل پلاستیک ایجاد شده در نمونه اتصال بتن ژئوپلیمری برای تغییر شکل‌های متوسط تا زیاد در حدود ۲۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر تخمین زده

جدول ۹. مقدارهای لنگر و جابجایی نسبی از آزمایش

Table 9. Moment values and corresponding lateral drift ratio of the test

$\delta_{peak}$ (%)	$M_{peak}$ (kN - m)	$M_n$ در $\delta$ (%)	$M_n$ (kN - m)	جهت	نوع بتن نمونه اتصال
۵/۲	۳۱/۸	۱	۱۸/۲	+	بتن ژئوپلیمری
۵/۲	۳۴/۶	۱	۱۸/۲	-	
۱/۴	۲۶/۳۲	۰/۷	۱۸/۲	+	بتن معمولی
۲/۷۵	۳۰/۴	۰/۶۴	۱۸/۲	-	

انجام روند بارگذاری و افزایش دامنه‌ی سیکل‌ها همواره کاهش سختی سازه و افزایش مقاومت اتفاق می‌افتد، اما در سیکل ۲/۷۵٪ نسبت به سیکل ۲/۲٪ کاهش مقاومت اتفاق افتاده است که علت این امر خرد شدن بتن در محل مفصل پلاستیک است. رفتار کلی نمونه به صورت شکل‌پذیر بوده و باریک‌شدگی حلقه‌های منحنی هیستریزس نسبت به نمونه‌ی بتن ژئوپلیمری کم‌تر است و جذب انرژی نمونه قابل قبول است. شایان ذکر است حداکثر تغییر شکل این نمونه مربوط به تغییر مکان جانبی نسبی ۲/۷۵٪ است.

مقایسه پاسخ هیستریزس دو نمونه نشان می‌دهد، نمونه اتصال با بتن ژئوپلیمری در هر دو راستای مثبت و منفی متقارن‌تر است. همچنین کاهش ظرفیت در تکرار سیکل‌های دوم و سوم در هر تغییر مکان جانبی نسبی در نمونه اتصال با بتن معمولی بیش‌تر مشاهده می‌شود. در هر صورت رفتار چرخه‌ای هر دو نمونه مشابه است و تفاوت چشم‌گیری مشاهده نشد.

۳-۴- ارزیابی عملکرد طبق آیین‌نامه‌ی ACI 374.1-05

در این بخش به بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال آزمایش شده بر اساس معیارهای پذیرش آیین‌نامه‌ی ACI 374.1-05، با عنوان «معیارهای پذیرش قاب‌های خمشی بر اساس آزمایش‌های سازه‌ای و تفسیر» پرداخته شده است. این آیین‌نامه برای صلاحیت داشتن اتصال به عنوان عضوی از یک قاب خمشی در شرایط لرزه‌ای شدید و به دست آوردن عملکرد رضایت‌بخش، الزاماتی را مطرح می‌کند.

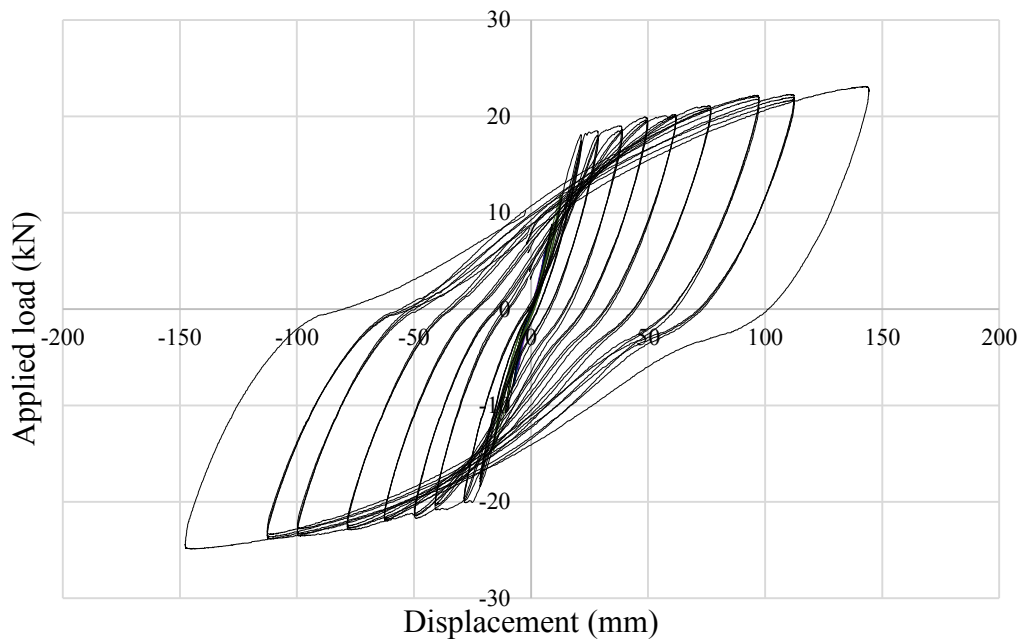
طبق این آیین‌نامه، برای پذیرش قاب خمشی با رفتار لرزه‌ای مناسب، باید در سومین چرخه‌ی تکرار تغییر مکان جانبی نسبی ۳/۵٪ معیارهای زیر

می‌شود. در صورتی که این مقدار به وسیله‌ی رابطه‌ی ارائه شده توسط پانایگوتاکوس و فردیس [۲۹] محاسبه شود، رابطه‌ی (۲)، این طول برابر ۲۴۵ میلی‌متر خواهد بود. در این رابطه،  $L_p$  برابر طول معادل مفصل پلاستیک بر حسب میلی‌متر،  $f_y$  تنش تسلیم فولاد بر حسب مگاپاسکال  $d_b$  قطر میلگرد بر حسب میلی‌متر و  $z$  فاصله‌ی مقطع بحرانی تا نقطه‌ی عطف در نمودار لنگر است. به عبارت دیگر طول مفصل پلاستیک در محدوده تغییر شکل‌های متوسط با این رابطه هماهنگ است و در تغییر شکل‌های بزرگ‌تر، مفصل پلاستیک توسعه بیشتری پیدا می‌کند که رابطه (۲) امکان پیش‌بینی این توسعه را ندارد.

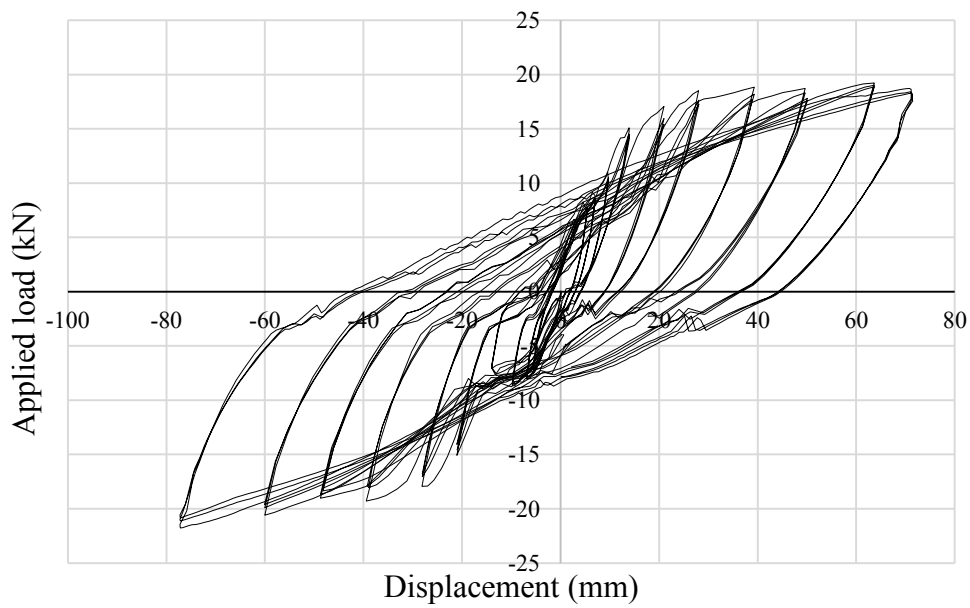
$$L_p = 0.12z + 0.014f_y d_b \quad (2)$$

طبق پاسخ هیستریزس نشان داده شده در شکل ۵-الف، در نمونه اتصال با استفاده از بتن ژئوپلیمری تا تغییر مکان جانبی نسبی ۰/۷۵٪ رفتار سازه به صورت کاملاً الاستیک است. در تغییر مکان جانبی نسبی ۱٪ نقطه‌ی شروع تسلیم شدگی برای نمونه اتفاق افتاده است. اما همچنان با افزایش دامنه‌ی سیکل‌های بارگذاری افزایش مقاومت و کاهش سختی با شیب بسیار آرام مشاهده می‌شود. رفتار کلی این نمونه به صورت شکل‌پذیر مشاهده شد. همچنین با افزایش تغییر مکان جانبی نسبی تا مقدار ۵/۲٪، بار حداکثر همچنان در حال افزایش است.

پاسخ هیستریزس نمونه‌ی بتن معمولی (شکل ۵-ب) نشان می‌دهد که با



(الف)



(ب)

شکل ۵. رفتار چرخه‌ای بار-تغییر مکان جانبی نسبی الف- نمونه اتصال با استفاده از بتن ژئوپلیمری ب- نمونه اتصال با استفاده از بتن معمولی

Fig. 5. Hysteresis behavior (Applied load vs. Beam tip displacement) A- Connection using geopolymer concrete B- Connection using ordinary concrete

جدول ۱۰. مقایسه نتیجه‌های آزمایش و معیارهای پذیرش آیین‌نامه‌ی *ACI 374.1-05*

Table 10. Comparison of test results and acceptance criteria of *ACI 374.1-05* regulation

$\frac{K_s}{K}$	$\beta$	$\frac{M_{3rd}}{M_{peak}}$	جهت	نوع بتن نمونه اتصال
$\geq 0.05$	$\geq 0.125$	$\geq 0.75$	معیار پذیرش	
0.27 0.17	0.73	0.98 0.96	+	بتن ژئوپلیمری
0.03 0.08	0.62	0.98 0.91	+	بتن معمولی
			-	

برای هر دو جهت بارگذاری تأمین شود:

الف) بیشینه‌ی نیروی اعمالی در هر دو جهت بارگذاری نباید کم‌تر از ۰/۷۵ بیشینه‌ی مقاومت جانبی در همان جهت باشد؛

ب) انرژی مستهلک شده‌ی نسبی  $\beta$  نباید کم‌تر از ۰/۱۲۵ باشد؛

ج) سختی سکانتی حدود صفر  $(K_s)$  که سختی سکانتی بین تغییر مکان جانبی نسبی ۰/۳۵- تا ۰/۳۵+ است، نباید کوچک‌تر از ۰/۰۵ سختی اولیه  $(K)$  از اولین چرخه در همان جهت باشد.

در جدول ۱۰، نتایج آزمایش که مرتبط با معیارهای پذیرش آیین‌نامه‌ی *ACI 374.1-05* هستند، ارائه شده است. معیارهای شرح داده شده‌ی الف، ب و ج به ترتیب در ستون‌های دوم تا چهارم جدول ۱۰ آمده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه اتصال با استفاده از بتن ژئوپلیمری کلیه‌ی معیارهای پذیرش برآورده شده و عملکرد رضایت‌بخش تلقی شده است. در این جدول علامت + و - بیانگر جهت مثبت و منفی بارگذاری طبق شکل ۵ هستند. طبق این جدول، نمونه اتصال با استفاده از بتن معمولی شرایط لازم برای پذیرش این آیین‌نامه را ندارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اثرات تخریب‌کننده‌ی محیط زیست توسط سیمان پرتلند و نیاز روز افزون آن در ساخت و ساز، پژوهش بر روی مصالح نوین جایگزین سیمان پرتلند ضروری به نظر می‌رسد. از این رو در این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری پرداخته شد. همچنین به منظور بررسی

کاربرد بتن ژئوپلیمری در اتصال تیر به ستون، دو نمونه نیم مقیاس از اتصال کناری ساخته شد. آزمایش بر روی نمونه‌های اتصال طبق پروتکل بارگذاری آیین‌نامه *ACI 374.1-05* انجام شد. نتیجه‌های به دست آمده در این پژوهش بدین قرار است:

با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم به علت افزایش یونیزه شدن سرباره و میزان تبلور محصولات واکنش سرباره، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. با کاهش نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم که موجب افزایش مقدار سیلیکات سدیم در بتن می‌گردد، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. علت این امر تشکیل بیش‌تر ژل C-A-S-H در بتن است.

در یک طرح یکسان با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم که به معنای افزایش میزان سود در بتن است، مقاومت کششی افزایش می‌یابد. در یک طرح یکسان با کاهش نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم، مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد.

با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم و کاهش نسبت وزنی محلول هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. همچنین ارتباط مشخصی بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن ژئوپلیمری مشاهده نشد.

اتصال تیر به ستون کناری با استفاده از بتن ژئوپلیمری، بر اساس معیارهای پذیرش آیین‌نامه‌ی *ACI 374.1-05* رفتار مناسب و عملکرد لرزه‌ای رضایت‌بخشی به همراه تشکیل مفصل پلاستیک در تیر داشته است.

- [6] Pacheco-Torgal, F. "Introduction to Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes". Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, 2014.
- [7] Chang, J.J., "A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes", Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 7, 1005-1011, 2003.
- [8] Altan, E. and Erdoğan, S.T. "Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures". Cement and Concrete Composites, Vol. 34, No.2, 131-139, 2012.
- [9] Najimi. M. Ghafoori. N. "Engineering properties of natural pozzolan/slag based alkali-activated concrete", Construction and Building Materials, Vol. 208, 46-62, 2019.
- [10] Taghvayi. H. Behfarnia. K. Khalili. M. "The Effect of Alkali Concentration and Sodium Silicate Modulus on the Properties of Alkali-Activated Slag Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 16, No. 7, 293-305, 2018
- [11] Shojaei. M. K. Behfarnia. R. Mohebi. "Application of alkali-activated slag concrete in railway sleepers," Materials and Design, No. 69, 89-95, 2015.
- [12] Sofi. M, Van Deventer. J.S.J, Mendis. P.A, Lukey. G.C, "Engineering properties of inorganic polymer Concretes (IPCs)," Cement and Concrete Research, Vol 37, 251-257, 2007.
- [13] Maranan G.B, A.C. Manalo,B. Benmokrane, W. Karunasena, P. Mendis, "Evaluation of the flexural strength and serviceability of geopolymer concrete beams reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars," Engineering Structures, Vol 101, 529-541, 2015
- [14] Dattatreya, J. K, Rajamane, NP, Sabitha, D. Ambily P. S, MC. Nataraja, "Flexural behaviour of reinforced Geopolymer concrete beams," Journal Civil and Structural Engineerings, pp. 138-159, 2011.
- [15] Park, R., and Paulay. T, "Reinforced Concrete Structures", John Wiley & Sons, New York, 1975.
- [16] Ghobarah, A. and Said, A, "Seismic Rehabilitation of Beam-Column Joints using FRP Laminates," Journal of Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 1, 113-129, 2001.

طبق نمودار هیستریزیس، نمونه‌ی اتصال تیر به ستون با استفاده از بتن ژئوپلیمیری تا تغییر مکان جانبی نسبی ۰/۷۵٪ رفتار کاملاً الاستیک داشته است که نشان از جذب انرژی تا این تغییر مکان توسط بتن و ایفای نقش بتن تا این تغییر مکان است. در تغییر مکان جانبی نسبی ۱٪ نقطه‌ی شروع تسلیم شدگی میلگردها اتفاق افتاده است. اما در نمونه اتصال با استفاده از بتن معمولی تا تغییر مکان جانبی نسبی ۰/۵٪ رفتار الاستیک است و بعد از این تغییر مکان تسلیم شدگی میلگردها اتفاق می‌افتد.

رفتار کلی دو نمونه اتصال مشابه است اما اتصال با بتن معمولی در تغییر مکان جانبی نسبی ۲/۲٪ شروع به کاهش ظرفیت نموده است، اما اتصال با بتن ژئوپلیمیری تا تغییر مکان جانبی نسبی ۵/۲٪ نیز هم‌چنان افزایش ظرفیت داشته است.

عرض ترک‌هایی که در نمونه اتصال با استفاده از بتن ژئوپلیمیری به وجود آمدند، بسیار کم‌تر از عرض ترک‌های ایجاد شده در بتن معمولی هستند. این موضوع نشان از چسبندگی بیش‌تر بتن ژئوپلیمیری با میلگردها نسبت به بتن معمولی و همگن‌تر بودن بتن ژئوپلیمیری است؛ هم‌چنین خرد شدن بتن در نمونه اتصال با استفاده از بتن ژئوپلیمیری اتفاق نیفتاد.

## منابع

- [1] Bondar. D. "Alkali Activation of Iranian Natural Pozzolans for Producing Geopolymer Cement and Concrete," A dissertation submitted to University of Sheffield in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, U.K, 2009.
- [2] Davidovits .J., "Geopolymers: inorganic polymeric new materials," International Journal of Thermal Analysis, Vol. 37, 1633-1656, 1991.
- [3] Nawy. E.G. "Concrete construction engineering handbook", Taylor & Francis Group, CRC press, 1071-1092, 2010.
- [4] Yang, L.Y. Jia, Z. J. Zhang. Y.M. Dai. J.G. "Effects of nano-TiO<sub>2</sub> on strength, shrinkage and microstructure of alkali activated slag pastes", Cement Concrete COMP, Vol. 57, No. 1, 1-7, 2015.
- [5] Duxson, P. Provis. J.L. G.C. Lukey. S.J. Jannie. V. Deventer. "The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'", Cement and Concrete Research. Vol. 37, No. 12. 1590-1597, 2007.



- [23] Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary, An ACI Standard, Reported by ACI Committee 374, American Concrete Institute, ACI 374.1-05, Farmington Hills, MI, 2005.
- [24] Iranian National Standard 302, "Concrete Aggregates and Properties", Second Revision, Iranian Institute of Standards and Industrial Research, Tehran, (2002-1381), (in persion)
- [25] ASTM C39/C39M-16, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [26] ASTM C496, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", ASTM International, 2017.
- [27] ASTM C469, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression", ASTM International, 2014.
- [28] ACI Committee 318-14, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (318R-14)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014.
- [29] Panagiotakos, T., and Fardis, M. N., "Deformation of RC Member at Yeilding and Utimate," ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 2, pp. 135-148, 2001.
- [17] ACI Committee 352-76 "Recommendation for design of beam-colmun joint in monolithic reinforced Concrete Structures", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1976.
- [18] ACI Committee 352-02 "Recommendation for design of beam-colmun joint in monolithic reinforced Concrete Structures", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2002.
- [19] Deepa Raj. S, Ganesan. N, Ruby. A, Anumol. R, "Behavior of geopolymer and conventional concrete beam column joints under reverse cyclic loading", Advances in Concrete Construction, Vol. 4, No. 3, 161-172, 2016.
- [20] Saranya. P, Nagarajan. P, Shashikala. A.P, "Behaviour of GGBS-dolomite geopolymer concrete beam-column joints under monotonic loading", Journal Structures, pp. 47-57, 2020.
- [21] Datta. M, Premkumar. G, "Comparative study of Geopolymer concrete with steel fibers in beam column joint ", International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol. 9. 234-247, 2018.
- [22] Nath. S, Lokeshwaran. N, "Behavior of Fiber reinforced Geopolymer Concrete beam column joint under cyclic loading.", International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol. 9. 355-364, 2018.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*T. Yousefi Qale-E Salimi , H. Tajmir Riahi, Investigation of Mechanical Properties of Geopolymer Concrete and Its Application in Beam-Column Joint, Amirkabir J. Civil Eng., 54(3) (2022) 851-868.*

DOI: 10.22060/ceej.2021.19108.7070



