

## بررسی مقاومت Pull-Off بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی و پودر ژئولیت طبیعی

سید احمد وزیری \*

دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران گرایش سازه، گروه مهندسی عمران، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

رحمت مدن دوست

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

ملک محمد رنجبر تکلیمی

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

### چکیده

در این مقاله اثر روش عمل آوری (دمای محیط (A)، اوون (O) و آب جوش (BW))، غلظت محلول سدیم هیدروکسید (۸ و ۱۲ مول در لیتر) و ضخامت دیسک (یعنی ۱، ۲ و ۳ سانتی متر) در مقاومت Pull-Off بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی و پودر ژئولیت طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار مقاومت Pull-Off به دست آمده از دیسک با ضخامت ۳ سانتی متر به طور میانگین ۲,۶ درصد بیشتر از مقدار به دست آمده از دیسک با ضخامت ۲ سانتی متر است. این بدان معناست که دیسک‌های با ضخامت‌های ۲ و ۳ سانتی متر مقادیر تقریباً برابری از مقاومت Pull-Off را نتیجه داده‌اند. علاوه بر این، مقدار مقاومت Pull-Off به دست آمده از دیسک با ضخامت ۲ سانتی متر به طور متوسط ۲۸,۴٪ بیشتر از مقدار به دست آمده از دیسک با ضخامت ۱ سانتی متر است. بر اساس نتایج به دست آمده از دیسک با ضخامت ۲ سانتی متر: الف) نسبت مقاومت Pull-Off بدست آمده از نمونه‌های عمل آوری شده در آب جوش و اوون به نمونه عمل آوری شده در دمای محیط به ترتیب برابر با ۱,۳۸۳ و ۱,۰۸۹ به دست آمده است. ب) با جایگزینی ۲۰٪ وزن سرباره کوره آهن گدازی با پودر ژئولیت طبیعی، مقاومت Pull-Off به طور متوسط ۱۶,۲۹٪ کاهش می‌یابد. ج) با افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید از ۸ به ۱۲ مول در لیتر، مقدار مقاومت Pull-Off به طور متوسط ۱۴,۴۸٪ افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج به دست آمده، یک رابطه غیر خطی قوی بین مقاومت فشاری و مقاومت Pull-Off بتن ژئوپلیمری وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: آزمایش Pull-Off، بتن ژئوپلیمری، ضخامت دیسک، روش عمل آوری، آب جوش، غلظت محلول سدیم هیدروکسید.

\* نویسنده مسئول: vazirijoon@gmail.com

## ۱- مقدمه

سانتیمتر ۱۸٪ کم تر از مقاومت دیسک به ضخامت ۳ سانتیمتر به دست آمد. اکبری معاف [۱۹] نشان داد که از دیسک‌های با ضخامت ۱، ۲ و ۳ سانتیمتر، بیشترین مقاومت Pull-Off بتن خودتراکم سبک مربوط به دیسک به ضخامت ۲ سانتیمتر است. شهیدزاده عربانی [۲۰] و قویدل و همکاران [۲۱] این نتیجه رسیدند که با افزایش ضخامت دیسک، مقاومت Pull-Off بتن معمولی و خودتراکم حاوی الیاف فولادی افزایش می‌یابد. علاوه بر این نشان دادند که مقادیر Pull-off بدست آمده از دیسک فولادی بیش تر از آلومینیومی است. Murray و Long [۴] به این نتیجه رسیدند که استفاده از یک دیسک با قطر ۵ سانتی متر مناسب بوده و نتایج به دست آمده از این دیسک از دقت بالایی برخوردار است. آیین نامه‌های BS1881-Part207 [۲] و BS EN 1542 [۲۲] توصیه می‌کنند که ضخامت دیسک‌های فولادی و آلومینیومی باید به ترتیب ۴۰٪ و ۶۰٪ از قطر آنها باشد. بنابراین ضخامت دیسک‌های فولادی و آلومینیومی با قطر ۵ سانتی متر باید حداقل ۲ سانتی متر و ۳ سانتی متر باشد.

امروزه استفاده از بتن‌های ژئوپلیمری که به عنوان مصالح ساختمانی دوستدار محیط زیست شناخته می‌شوند، در صنعت ساخت و ساز در حال گسترش است [۲۳ و ۲۴]. این مواد با خواص مکانیکی و دوام عالی به عنوان جایگزین‌های خوبی برای بتن‌های معمولی بر پایه سیمان پرتلند محسوب می‌شوند [۲۵ و ۲۶]. نشان داده شده است که عواملی مانند: نوع ماده آلومیناسیلیکاتی [۲۵ و ۲۷-۳۰]، غلظت محلول قلیایی فعال کننده [۳۱-۳۸] و همچنین زمان و دما عمل‌آوری [۳۹] بر خواص بتن ژئوپلیمری تأثیر می‌گذارد. محمدی فتیده و رنجبر تکلیمی [۴۰] نشان دادند که با جایگزینی ۲۰٪ از وزن سرباره کوره آهن‌گدازی با زئولیت، زمان گیرش خمیر ژئوپلیمری بدلیل جذب آب بالای زئولیت، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نشان دادند که با این جایگزینی، مقاومت فشاری خمیر کاهش می‌یابد. عرفانی منش و شربتدار [۴۱] نشان دادند که جایگزینی ۲۵ درصد وزن سرباره کوره آهن‌گدازی با پودر زئولیت طبیعی، مقاومت فشاری و کششی ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری فعال شده توسط کربنات سدیم کاهش می‌یابد. ثابت شده است که غلظت محلول سدیم هیدروکسید یک عامل موثر بر خواص مکانیکی ژئوپلیمرها است. Degirmenci [۴۲] اثرات غلظت محلول سدیم هیدروکسید (۸، ۱۰ و ۱۲ مول در لیتر)، نسبت وزنی محلول

Pull-Off یک روش نیمه مخرب است که برای تعیین مقاومت نزدیک به سطح بتن در محل سرویس‌دهی استفاده می‌شود [۱]. این روش در آیین نامه‌های BS 1881-Part4 [۲] و ASTM C1583/C1583M [۳] توصیه شده است. ثابت شده است که آزمایش Pull-Off یک روش قابل اعتماد برای تخمین مقاومت بتن در محل سرویس‌دهی است [۴-۷]. مقاومت فشاری بتن ( $f_c$ ) را می‌توان به راحتی از طریق رابطه همبستگی بین  $f_c$  و مقاومت Pull-Off تخمین زد [۶ و ۷]. این رابطه می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی قرار گیرد. این عوامل همان عواملی هستند که همبستگی بین مقاومت فشاری و کششی بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۸]. مقاومت Pull-Off بتن تحت تأثیر عواملی مانند نوع، ضخامت و قطر دیسک، سرعت بارگذاری، حداکثر اندازه سنگ‌دانه، نوع و ترکیبات تشکیل دهنده بتن، نوع سنگ‌دانه‌ها، شرایط عمل‌آوری، تخلخل و اندازه نمونه قرار دارد [۹-۱۸]. ویژگی‌های دیسک از جمله نوع، قطر و ضخامت، عوامل مهمی هستند که بر مقاومت Pull-Off بتن تأثیر می‌گذارند [۶، ۱۱ و ۱۳]. Bungey و Madandoust اثر نوع و ضخامت دیسک را بر روی مقاومت Pull-Off بتن‌های سبک وزن و وزن معمولی ارزیابی کرده‌اند [۶]. آنها به این نتیجه رسیدند که: الف) مقاومت Pull-Off بتن سبک کمتر از بتن با وزن معمولی است. ب) هرچه مدول الاستیسیته بتن کمتر باشد، توزیع تنش بتن در ناحیه شکست غیریکنواخت تر خواهد بود. این منجر به کاهش بار شکست نسبت به مقاومت کششی بتن می‌شود. استفاده از یک دیسک با ضخامت کافی می‌تواند این اثر را کاهش دهد. ج) مقاومت Pull-Off به دست آمده از دیسک فولادی بیش تر از دیسک آلومینیومی است. این مسئله به دلیل توزیع یکنواخت تنش و در نتیجه بار شکست بیش تر است. د) برای ضخامت ۳ سانتی‌متر، دیسک‌های آلومینیومی و فولادی هر دو مقاومت شکست برابری می‌دهند. ه) با افزایش ضخامت دیسک‌های آلومینیومی و فولادی از ۱ سانتی متر به ۳ سانتی متر، مقادیر مقاومت Pull-Off افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش ضخامت، توزیع تنش یکنواخت تر می‌شود. و) دیسک فولادی با قطر ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۳ سانتی‌متر انتخاب مناسبی برای ارزیابی مقاومت کششی بتن با آزمایش Pull-Off است. ز) مقاومت Pull-Off دیسک آلومینیومی به ضخامت ۲

Baradan [50]، Altan و Ardogan [51] و Chi [52] نشان دادند که عمل آوری در دما و رطوبت بالا موجب افزایش قابل توجه در مقاومت ژئوپلیمر بر پایه سرباره کوره آهن گدازی می‌شود. امروزه با توجه به گسترش استفاده از بتن ژئوپلیمری، کنترل کیفیت این مصالح ساختمانی جدید در محل سرویس دهی با استفاده از روش‌هایی مانند آزمایش Pull-Off اهمیت بیشتری یافته است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش Pull-Off به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع، مشخصات و ترکیبات تشکیل دهنده بتن است. به همین دلیل، می‌توان انتظار داشت که مقاومت Pull-Off بتن‌های ژئوپلیمری و بتن‌های بر پایه سیمان پرتلند معمولی متفاوت باشند. بنابراین لازم است پایایی این آزمایش بر روی بتن‌های ژئوپلیمری به‌طور جامع مورد بررسی قرار گیرد. در مقاله حاضر اثر روش عمل آوری (دمای محیط (A)، اوون (O) و آب جوش (BW))، و غلظت محلول سدیم هیدروکسید (۸ و ۱۲ مول در لیتر) و ضخامت دیسک (۱، ۲ و ۳ سانتی متر) روی مقاومت Pull-Off بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی و پودر زئولیت طبیعی بررسی شده است. علاوه بر این، پارامترهایی مانند: نسبت مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های عمل آوری شده در آب جوش و نمونه‌های عمل آوری شده در اوون به نمونه‌های عمل آوری شده در دما محیط (  $f_c(BW/A)$  و  $f_c(O/A)$  )، نسبت مقاومت فشاری ۲۸ روزه به دست آمده از نمونه‌های حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر به نمونه‌های به دست آمده از نمونه‌های با غلظت محلول ۸ مول در لیتر (  $f_c(12/8)$  )، نسبت مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بر پایه سرباره کوره آهن گدازی و پودر زئولیت طبیعی به نمونه بر پایه سرباره کوره آهن گدازی (  $f_c(GZ/G)$  ) و همچنین نسبت مقاومت Pull-Off بدست آمده از دیسک به ضخامت ۳ سانتیمتر به ۱ سانتیمتر (  $POS_{3/1}$  )، نسبت مقاومت Pull-Off بدست آمده از دیسک به ضخامت ۳ سانتیمتر به ۲ سانتیمتر (  $POS_{3/2}$  )، نسبت مقاومت Pull-Off بدست آمده از دیسک به ضخامت ۲ سانتیمتر به ۱ سانتیمتر (  $POS_{2/1}$  )، نسبت مقاومت Pull-Off بدست آمده از نمونه‌های عمل آوری شده در آب جوش به دما محیط (  $POS_{BW/A}$  )، نسبت مقاومت Pull-Off بدست آمده از نمونه‌های عمل آوری شده در آب جوش به اوون (  $POS_{BW/O}$  )، نسبت مقاومت Pull-Off بدست آمده از نمونه‌های عمل آوری

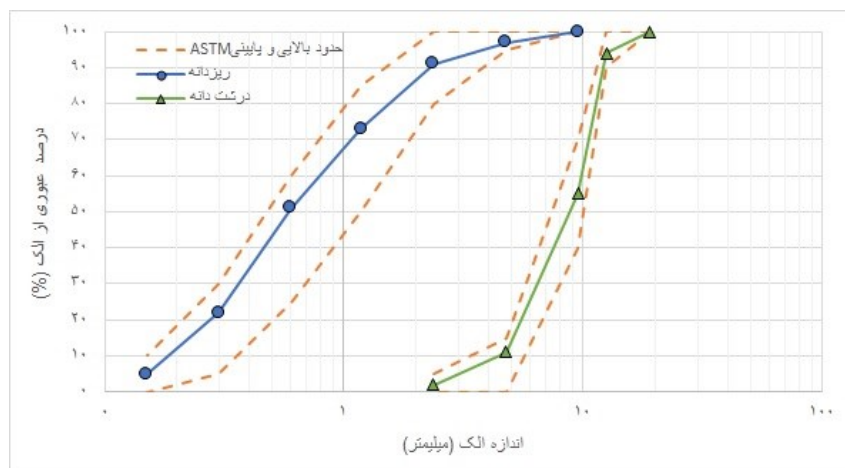
سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید (نسبت‌های ۱، ۲ و ۳) و نوع ماده آلومیناسیلیکاتی بر روی خصوصیات مهندسی ملات‌های ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، سرباره کوره آهن گدازی و پودر زئولیت طبیعی بررسی کرده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید و نسبت محلول سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید، خصوصیات مکانیکی ملات‌های ژئوپلیمر افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نشان داده شده است که با جایگزینی ۵۰٪ وزن سرباره کوره آهن گدازی با پودر زئولیت طبیعی، مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمر کاهش می‌یابد. روش عمل آوری عامل دیگری است که بر خصوصیات مکانیکی بتن‌های ژئوپلیمری تأثیر می‌گذارد [۴۳]. علاوه بر این، دما و مدت عمل آوری نیز دو عامل شناخته شده‌ای هستند که به‌طور قابل توجهی بر ویژگی‌های مکانیکی بتن‌های ژئوپلیمری تأثیر می‌گذارند [۲۶]، ۴۴ و ۴۵. Yewale و همکاران [۴۶] اثرات چهار روش عمل آوری مختلف شامل عمل آوری در اوون، بخار آب، آب و دمای محیط را بر روی خصوصیات مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه بر خاکستر بادی بررسی کرده‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند که: الف) هر چه دمای عمل آوری بالاتر باشد، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بیشتر خواهد بود. ب) بیشترین مقاومت فشاری از نمونه‌های عمل آوری شده در اوون به دست می‌آید. ج) عمل آوری با بخار خواص مکانیکی بالاتری را نسبت به عمل آوری با آب نتیجه می‌دهد. و د) خصوصیات مکانیکی نمونه‌های عمل آوری شده در دمای محیط بیش تر از نمونه‌های عمل آوری شده در آب است. Nurrudin و همکاران [۴۳] اثر سه روش عمل آوری مختلف مانند گونی داغ، دما محیط و اوون را بر روی خصوصیات مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی و خاکستر پوسته برنج، مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها نشان دادند که بالاترین مقاومت فشاری از نمونه‌های عمل آوری شده در اوون به دست می‌آید Yunsheng و همکاران [۴۷] نشان دادند که مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی عمل آوری شده در دما محیط کمتر از بتن عمل آوری شده با بخار آب است. Kong و همکاران [۴۸] به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقاومت فشاری ملات بر پایه سرباره کوره آهن گدازی به ترتیب از نمونه‌های عمل آوری شده در بخار آب، اوون و دمای معمولی به دست می‌آید. Nasr و همکاران [۴۹]، Aydin و

کردن مقدار معینی سود سوزآور در آب تهیه شد. سود سوزآور با خلوص ۹۹ درصد از شرکت پتروگهر خریداری شده است. سیلیکات سدیم مایع با چگالی ۱۵۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت مدول ۲/۰۷ از شرکت سیلیکات ایران تهیه شد.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی موجود در سرباره کوره آهن گدازی

و پودر زئولیت طبیعی		
سرباره کوره آهن گدازی (GGBFS)	پودر زئولیت طبیعی (NZZP)	ترکیبات
درصد وزنی (%)	درصد وزنی (%)	
35.7	68.95	SiO <sub>2</sub>
11.2	11.14	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1.2	0.97	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
37	4.83	CaO
11	0.79	MgO
0.68	0.9	K <sub>2</sub> O
0.6	0.95	Na <sub>2</sub> O
1.58	-	MnO
-	0.068	SO <sub>3</sub>

درشت دانه های مصرفی از نوع شکسته طبیعی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر و چگالی ۲۶۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. ریزدانه مورد استفاده با چگالی ۲۵۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول ریزدانه ۲/۶ می باشد. نمودار دانه بندی درشت دانه و ریزدانه شکل ۱ نشان داده شده است. سنگ دانه های مورد استفاده معیارهای پیشنهادی در ASTM C33 را برآورده کرده اند [۵۳].



شکل ۱- نمودار دانه بندی درشت دانه و ریزدانه مصرفی

های بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی (۱۰۰٪) و سری دوم شامل نمونه های بتن ژئوپلیمری بر پایه ترکیبی از سرباره کوره آهن گدازی (۹۰٪) و پودر زئولیت طبیعی (۱۰٪) می باشد.

شده در اوون به دما محیط (POS<sub>0/A</sub>)، نسبت مقاومت Pull-Off به دست آمده از نمونه های حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ به ۸ مول در لیتر (POS<sub>12/8</sub>) و نسبت مقاومت Pull-Off به دست آمده از نمونه های بر پایه سرباره کوره آهن گدازی و پودر زئولیت طبیعی به نمونه های حاوی سرباره کوره آهن گدازی (POS<sub>GZ/G</sub>) ارزیابی شده اند. در نهایت، همبستگی بین f<sub>c</sub> و مقاومت Pull-Off بتن های ژئوپلیمری عمل آوری شده در شرایط مختلف تعیین شده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد و مصالح

در تحقیق حاضر، سرباره کوره آهن گدازی به صورت تنها و ترکیب شده با پودر زئولیت طبیعی (با هدف افزایش زمان گیرش) به عنوان منبع آلومیناسیلیکاتی در تولید بتن ژئوپلیمری استفاده شد. سرباره کوره آهن گدازی با چگالی ۲۸۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب از کارخانه سیمان سپاهان اصفهان تهیه گردید. ترکیبات شیمیایی این ماده در جدول ۱ ارائه شده است. پودر زئولیت طبیعی با چگالی ۲۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب از کارخانه نگین پودر خریداری شد (جدول ۱). محلول قلیایی فعال کننده، ترکیبی از محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم مایع با نسبت ۱:۱ می باشد. محلول هیدروکسید سدیم در غلظت های ۸ و ۱۲ مول در لیتر با حل

### ۲-۲- نسبت مخلوط ها و آماده سازی نمونه ها

در این مقاله در مجموع دو سری و هر سری شامل چهار طرح مخلوط بتن تهیه شده است (جدول ۲). سری اول شامل مخلوط

- در تولید نمونه‌های هر سری از محلول هیدروکسید سدیم با دو غلظت مختلف ۸ و ۱۲ مول در لیتر استفاده شده است. تمامی نمونه‌ها در سه شرایط مختلف شامل دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد)، در اوون (۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت) و در آب جوش (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۲ ساعت) عمل‌آوری شدند. مراحل اختلاط بتن ژئوپلیمری به شرح زیر می‌باشد.
- مواد خشک شامل سنگ‌دانه‌ها، سرباره کوره آهن‌گدازی و پودر ژئولیت طبیعی به مدت سه دقیقه مخلوط شدند.
- محلول فعال‌کننده قلیایی که ۲۴ ساعت قبل تهیه شده بود به آرامی به مواد خشک اضافه گردید و فرآیند اختلاط تا دست‌یابی به یک مخلوط همگن ادامه یافت.
- مخلوط تازه بتن ژئوپلیمری در سه لایه در قالب ریخته شد و با استفاده از میز ارتعاش متراکم گردید.
- پس از ۲۴ ساعت قالب برداری انجام شد و نمونه‌ها در سه شرایط مختلف از پیش تعریف شده (دما محیط، اوون و آب جوش) تحت عمل‌آوری قرار گرفتند.

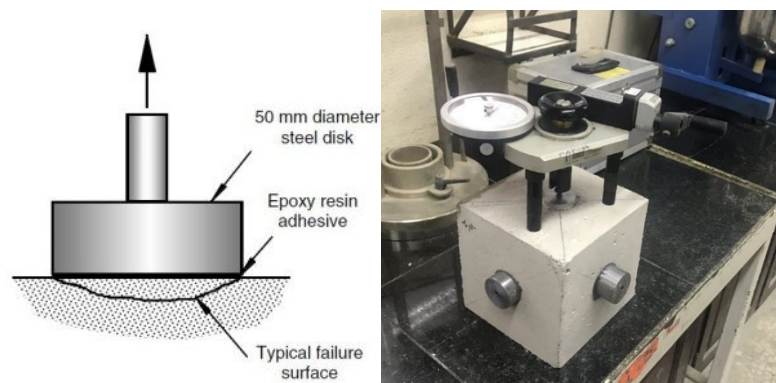
جدول ۲- طرح مخلوط‌ها

طرح مخلوط				ترکیبات
D	C	B	A	
۳۲۰	۳۲۰	۴۰۰	۴۰۰	سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS)، ( $\text{Kg/m}^3$ )
۸۰	۸۰	۰	۰	پودر ژئولیت طبیعی (NZP)، ( $\text{Kg/m}^3$ )
۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	محلول سیلیکات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )، ( $\text{Kg/m}^3$ )
۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	محلول هیدروکسید سدیم (NaOH)، ( $\text{Kg/m}^3$ )
۱۲	۸	۱۲	۸	غلظت محلول هیدروکسید سدیم (NaOH)، (mole/litre)
۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	محلول قلیایی کل، ( $\text{Kg/m}^3$ )
۱	۱	۱	۱	نسبت محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ )
۰,۵۵	۰,۵۵	۰,۵۵	۰,۵۵	نسبت محلول قلیایی کل به ماده پایه (Al/Bi)
۷۴۰	۷۴۰	۷۴۰	۷۴۰	درشت دانه، ( $\text{Kg/m}^3$ )
۱۱۱۰	۱۱۱۰	۱۱۱۰	۱۱۱۰	ریزدانه، ( $\text{Kg/m}^3$ )

بر روی ۶ عدد نمونه مکعبی با ابعاد ۲۰ سانتی‌متر بر اساس BS 207-1881 انجام شد [۲]. دستگاه آزمایش Pull-off با ظرفیت کششی ۱۶ کیلونیوتن می‌باشد (شکل ۲). برای ارزیابی اثر ضخامت دیسک، برای هر نمونه از دیسک‌های فولادی با قطر ۵ سانتی‌متر و ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر استفاده گردید.

### ۳-۲- روش آزمایش

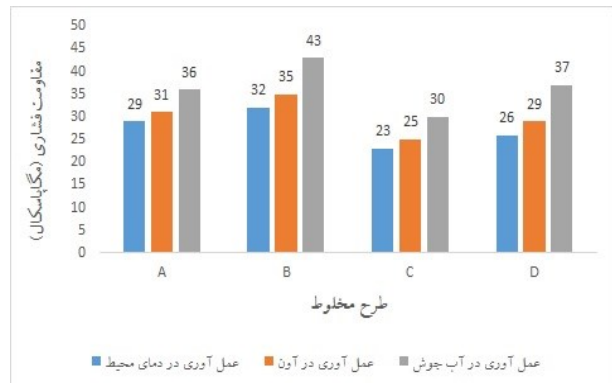
در این مقاله از سه نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر برای تعیین مقاومت فشاری ۲۸ روزه هر طرح مختلط بر اساس ASTM C39/C39M-18 استفاده شده است [۵۴]. علاوه بر این، برای تعیین مقاومت Pull-Off ۲۸ روزه هر نمونه، آزمایش Pull-Off



شکل ۲- آزمایش Pull-Off

### ۳- نتایج و بحث

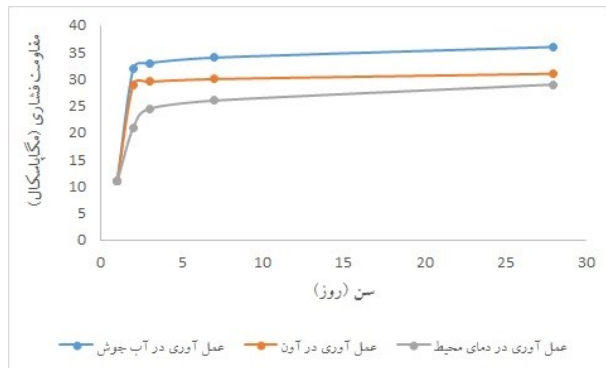
مقاومت فشاری ۲۸ روزه همه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری که در شرایط مختلف عمل آوری شده‌اند در شکل ۳ ارائه شده است.



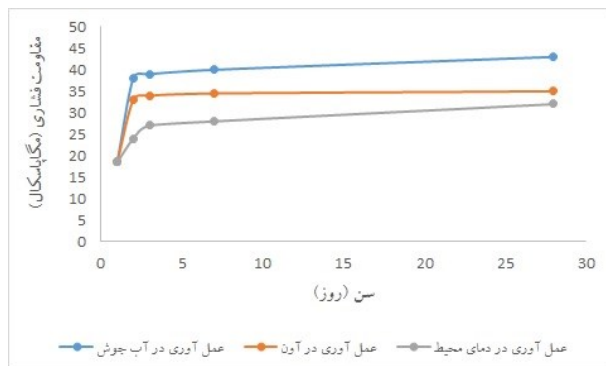
شکل ۳- مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری عمل آوری شده در شرایط مختلف

ریزساختاری پایین تری را از نظر کمیت و کیفیت نسبت به نمونه های عمل آوری شده در آب جوش دارند. موارد مذکور، دلایل اصلی بیش تر بودن مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در آب جوش نسبت به اوون می باشد.

در شکل های ۴ تا ۷، تغییرات مقاومت فشاری ( $f_c$ ) نسبت به سن در برای همه نمونه های عمل آوری شده در شرایط مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴- نمودار مقاومت فشاری-سن بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مول در لیتر



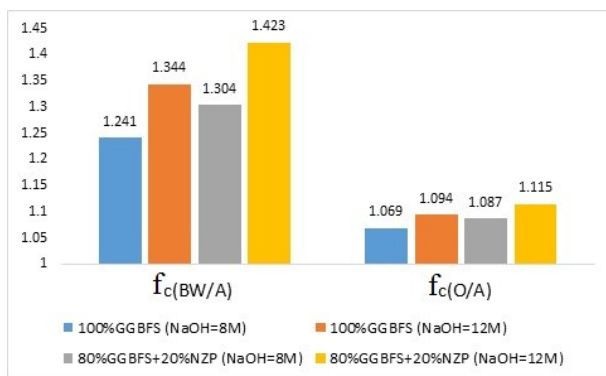
شکل ۵- نمودار مقاومت فشاری-سن بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر

نتایج نشان می‌دهد که بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی عمل آوری شده در آب جوش، اوون و دمای محیط به ترتیب ۱۸، ۹۱، ۹۶، ۱۵ و ۴۳، ۸۴ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه خود را در سن ۳ روزگی به دست می‌آورند. علاوه بر این، به ترتیب حدود ۲۴، ۸۱، ۴۱، ۹۵ و ۴۱، ۷۲ درصد از مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی و پودر ژئولیت طبیعی عمل آوری شده در آب جوش، اوون و دمای

نتایج نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل مقادیر  $f_c$  به ترتیب از نمونه‌های عمل آوری شده در آب جوش و در دمای محیط به دست می‌آید. این می‌تواند به دلیل دمای بالاتر آب جوش در مقایسه با سایر روش‌های عمل آوری مورد استفاده در این مطالعه باشد [۴۶]. از دیدگاه سینتیک شیمیایی، افزایش دما موجب افزایش سرعت واکنش ژئوپلیمریزاسیون و در نتیجه افزایش مشخصات مکانیکی می‌گردد [۴۳، ۴۸، ۵۵ و ۵۶]. به همین دلیل نمونه‌های عمل آوری شده در آب جوش و اوون مقاومت فشاری بالاتری را نسبت به نمونه‌های عمل آوری شده در دمای محیط دارند. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در آب جوش بیش تر از نمونه‌های عمل آوری شده در اوون می‌باشند. تحقیقات نشان می‌دهد که عمل آوری بتن ژئوپلیمری در رطوبت بالا موجب کاهش انقباض ناشی از خشک شدن بتن می‌گردد [۴۳، ۵۰، ۵۶ و ۵۷]. بنابراین، در نمونه‌های عمل آوری شده در آب جوش انقباض بسیار کم تری نسبت به نمونه‌های عمل آوری شده در اوون ایجاد می‌شود. در نمونه‌های عمل آوری شده در اوون، آب حاصل از واکنش ژئوپلیمریزاسیون به سرعت از نمونه خارج شده و در اثر ایجاد ریزترک‌های ناشی از انقباض خشک شدن، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد [۴۸ و ۵۸]. علاوه بر این، دمای عمل آوری در اوون برابر ۶۰ درجه سانتیگراد است که کم تر از دمای آب جوش برابر ۱۰۰ درجه می‌باشد. بنابراین، نمونه‌های عمل آوری شده در اوون مشخصات

در این نمونه ها با شیب کم تری صورت می گیرد [۴۸ و ۵۹]. در نمونه های عمل آوری شده در اوون، ریزترک های متعدد ایجاد شده در اثر انقباض ناشی از خشک شدن، موجب می شود که شیب تغییرات مقاومتی نسبت به سن بتن بسیار کم باشد.

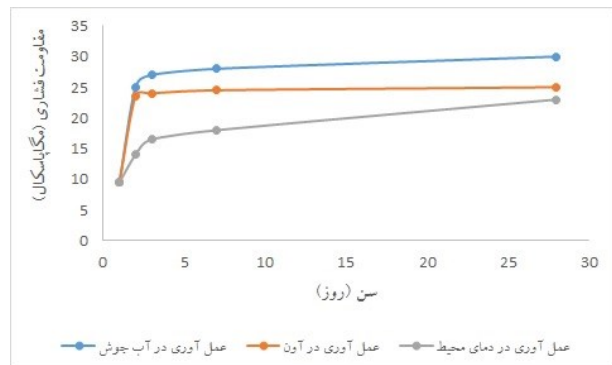
نسبت های  $f_c(O/A)$  و  $f_c(BW/A)$  برای نمونه های بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی و بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی حاوی غلظت های مختلف محلول سدیم هیدروکسید در شکل ۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، در بتن بر پایه سرباره کوره آهن گدازی نسبت  $f_c(BW/A)$  برای محلول های هیدروکسید سدیم ۱۲ و ۸ مول در لیتر به ترتیب برابر با ۱,۳۴۴ و ۱,۲۴۱ است. در حالی که، در بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی، این نسبت ها به ترتیب برابر با ۱,۴۲۳ و ۱,۳۰۴ برای غلظت های بالاتر و پایین تر محلول های هیدروکسید سدیم هستند.



شکل ۸- نسبت های  $f_c(O/A)$  و  $f_c(BW/A)$

نتایج نشان می دهد که هر چه غلظت محلول هیدروکسید سدیم بیشتر باشد، نسبت  $f_c(BW/A)$  بیشتر خواهد بود. علاوه بر این، این نسبت در بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی بیشتر از بتن بر پایه سرباره کوره آهن گدازی می باشد. مطابق نتایج به دست آمده، در بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی حاوی محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۲ و ۸ مول در لیتر، نسبت  $f_c(O/A)$  به ترتیب برابر با ۱,۰۹۴ و ۱,۰۶۹ است. این نسبت ها برای بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی برابر با ۱/۱۱۵ و ۱/۰۸۷ برای غلظت های ۱۲ و ۸ مول در لیتر می باشد. از نتایج به دست آمده می توان نتیجه گرفت که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم، نسبت  $f_c(O/A)$  افزایش می یابد. علاوه بر این، این نسبت

محیط، در ۳ روز اول کسب می شود. بر اساس نتایج بدست آمده، بیش ترین شیب تغییرات مقاومت فشاری - سن بتن به ترتیب به نمونه های عمل آوری شده در دمای محیط، آب جوش و اوون مربوط می شود.



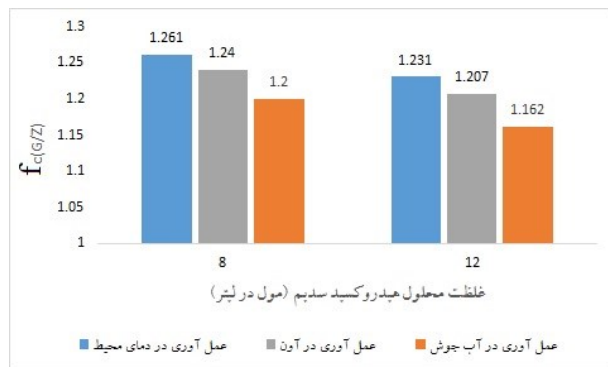
شکل ۶- نمودار مقاومت فشاری-سن بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مول در لیتر



شکل ۷- نمودار مقاومت فشاری-سن بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر

در نمونه های عمل آوری شده در دمای محیط، به علت پایین تر بودن دمای عمل آوری، فرایند ژئوپلیمریزاسیون با سرعت کم تری انجام می شود. به همین دلیل روند کسب مقاومت در این نمونه ها با گذشت زمان ادامه می یابد. در نمونه های عمل آوری شده در آب جوش و اوون، به علت بالا بودن دمای عمل آوری محصول ژئوپلیمری به سرعت بر روی سطح ذرات سرباره کوره آهن گدازی تشکیل می شود و بعلاوه نفوذناپذیر بودن این سطح ایجاد شده، محلول قلیایی قادر به نفوذ در قسمت های داخلی ذرات سرباره کوره آهن گدازی که هنوز در واکنش شرکت ننموده است، نمی باشد. به همین دلیل روند کسب مقاومت نسبت به زمان

هیدروکسید سدیم با غلظت های مختلف و عمل آوری شده در شرایط مختلف در شکل ۱۰ ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، نسبت  $f_c(G/Z)$  برای نمونه های حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر عمل آوری شده در آب جوش، اوون و دمای محیط به ترتیب ۱،۱۶۲، ۱،۲۰۷ و ۱،۲۳۱ است. این نسبت ها برای نمونه های حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مول در لیتر عمل آوری شده در شرایط مذکور به ترتیب برابر با ۱،۲، ۱،۲۴ و ۱،۲۶۱ است.

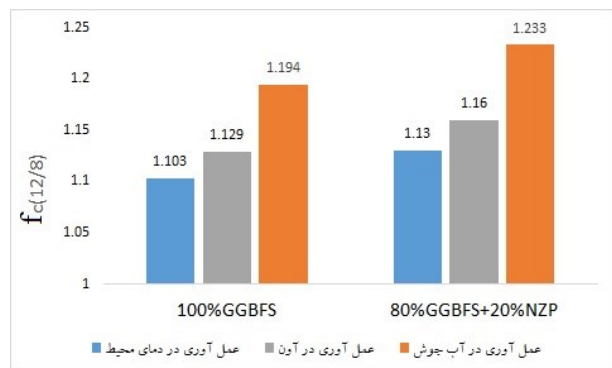


شکل ۱۰- نسبت های  $f_c(G/Z)$

نتایج نشان می دهد که جایگزینی ۲۰ درصد از وزن سرباره کوره آهن گدازی با پودر زئولیت طبیعی منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن می شود. مقدار کلسیم موجود در مخلوط متغیری است که به طور مستقیم بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری تأثیر می گذارد. سرباره کوره آهن گدازی حاوی ۳۷ درصد اکسید کلسیم (CaO) است، در حالی که پودر زئولیت طبیعی فقط ۴،۸۳ درصد اکسید کلسیم دارد. بنابراین، به دلیل کم تر بودن مقدار کلسیم در پودر زئولیت طبیعی، جایگزینی ۲۰ درصد از وزن سرباره کوره آهن گدازی با پودر زئولیت طبیعی منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می شود [۴۲]. علاوه بر این، زئولیت دارای ساختار ساختار بهم می ریزد و به یک ماده آمورف مبدل می گردد. در نتیجه مقاومت فشاری کاهش می یابد [۴۰ و ۶۴].

بر اساس نتایج بدست آمده، بیش ترین و کم ترین میزان کاهش به ترتیب مربوط به نمونه های عمل آوری شده در دمای محیط و در آب جوش می باشد. علاوه بر این، نتایج نشان می دهد که میزان کاهش مقاومت فشاری با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم، کاهش می یابد.

در بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت بیشتر از بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی است. نسبت  $f_c(12/8)$  برای هر دو بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت و بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی که در شرایط مختلف عمل آوری شده اند، در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹- نسبت های  $f_c(12/8)$

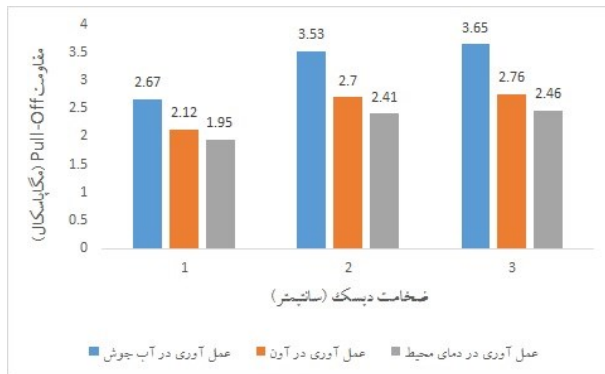
از نتایج بدست آمده می توان نتیجه گرفت که با افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می یابد. با افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید، فرآیند ژئوپلیمریزاسیون تسریع می شود و مقادیر بیش تری از آلومینا و سیلیس که در سرباره کوره آهن گدازی و پودر زئولیت طبیعی وجود دارند، حل می شوند. در نتیجه، یک شبکه آلومیناسیلیکاتی غنی از آلومینا و سیلیس با خواص مکانیکی بالاتر تشکیل می شود [۶۰-۶۳]. علاوه بر این، نتایج نشان می دهد که در بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی، نسبت  $f_c(12/8)$  برای نمونه های عمل آوری شده در آب جوش، اوون و دمای محیط به ترتیب برابر با ۱،۱۶۲، ۱،۱۲۹ و ۱،۱۰۳ است. این نسبت ها برای بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت به ترتیب ۱،۲۳۳، ۱،۱۶ و ۱،۱۳ است. از نتایج بدست آمده می توان دریافت که بیش ترین و کم ترین تأثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم در مقاومت فشاری بتن، به ترتیب مربوط به نمونه های عمل آوری شده در آب جوش و دمای محیط می باشد. علاوه بر این، اثر این متغیر در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت بیش تر از بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی است.

نسبت  $f_c(G/Z)$  برای بتن های ژئوپلیمری حاوی محلول





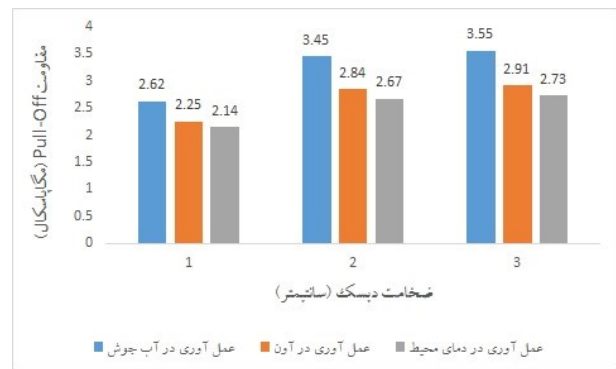
شکل ۱۳- نمودار مقاومت Pull-Off - ضخامت دیسک بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مول در لیتر عمل آوری شده در شرایط مختلف



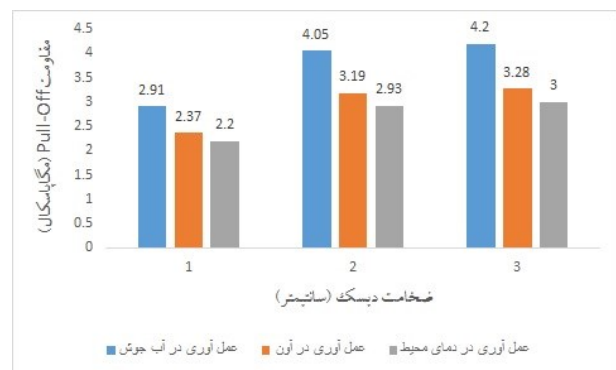
شکل ۱۴- نمودار مقاومت Pull-Off - ضخامت دیسک بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر عمل آوری شده در شرایط مختلف

نسبت مقاومت Pull-Off به دست آمده از دیسک با ضخامت ۳ سانتی متر به دیسک های با ضخامت ۱ و ۲ سانتی متر در شکل ۱۵ تا ۱۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار متوسط POS (3/2) برای همه نمونه‌ها تقریباً برابر با ۱,۰۲۶ است. این نشان می‌دهد که مقاومت Pull-off متوسط POS (2/1) و POS (3/1) برای همه نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۱,۲۸۳۹ و ۱,۳۱۷۳ است. نسبت های بدست آمده در این مطالعه برای بتن ژئوپلیمری با نسبت های ارائه شده توسط محققان دیگر برای سایر بتن ها متفاوت است. Madandoust و Bungey [۶] نشان دادند که در بتن سبک و معمولی، POS<sub>3/2</sub> برای دیسک آلومینیومی برابر ۱,۲۲ می‌باشد. قویدل و همکاران [۲۱] به این نتیجه رسیدند که در بتن خودتراکم حاوی الیاف فولادی، نسبت POS<sub>3/1</sub> برای دیسک فولادی و

مقادیر مقاومت Pull-Off به دست آمده از نمونه‌های بتن ژئوپلیمری مورد بررسی در این تحقیق در شکل های ۱۱ تا ۱۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد: الف) با افزایش ضخامت دیسک، مقادیر مقاومت Pull-Off افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش ضخامت دیسک، توزیع تنش یکنواخت تر می‌شود و در نتیجه بار شکست افزایش می‌یابد [۶]. ب) حداکثر و حداقل مقادیر مقاومت Pull-Off به ترتیب مربوط به نمونه‌های عمل آوری شده در آب جوش و دمای محیط می‌باشد. ج) با افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید، مقاومت Pull-Off همه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. د) مقاومت Pull-Off بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی بیشتر از بتن بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی است. به عبارت دیگر با جایگزینی ۲۰ درصد وزن سرباره کوره آهن گدازی با پودر زئولیت طبیعی، مقادیر مقاومت Pull-Off کاهش می‌یابد.

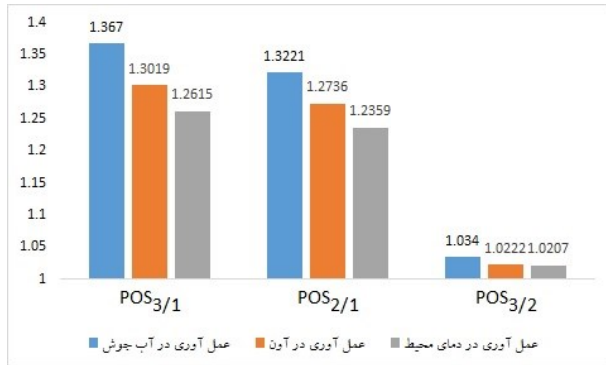


شکل ۱۱- نمودار مقاومت Pull-Off - ضخامت دیسک بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مول در لیتر عمل آوری شده در شرایط مختلف

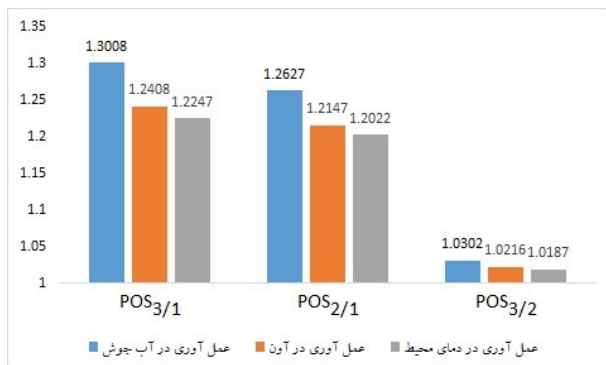


شکل ۱۲- نمودار مقاومت Pull-Off - ضخامت دیسک بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر عمل آوری شده در شرایط مختلف

بدست آمده، با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم، مقادیر نسبت های  $POS(3/2)$ ،  $POS(2/1)$  و  $POS(3/1)$  افزایش می یابند. علاوه بر این، جایگزینی ۲۰ درصد از وزن سرباره کوره آهن گدازی با پودر ژئولیت طبیعی منجر به کاهش مقادیر این نسبت ها می شود.



شکل ۱۷- مقادیر  $POS(3/2)$ ،  $POS(2/1)$  و  $POS(3/1)$  برای بتن ژئولیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر ژئولیت طبیعی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر

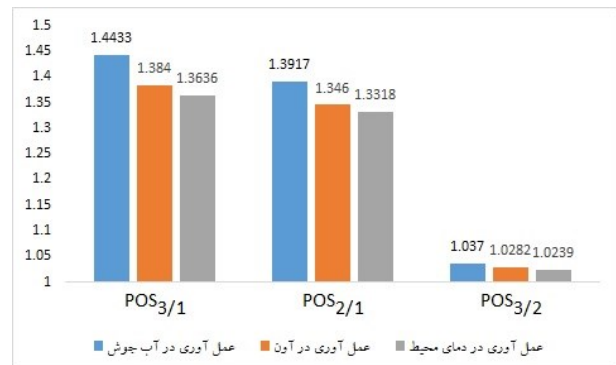


شکل ۱۸- مقادیر  $POS(3/2)$ ،  $POS(2/1)$  و  $POS(3/1)$  برای بتن ژئولیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر ژئولیت طبیعی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مول در لیتر

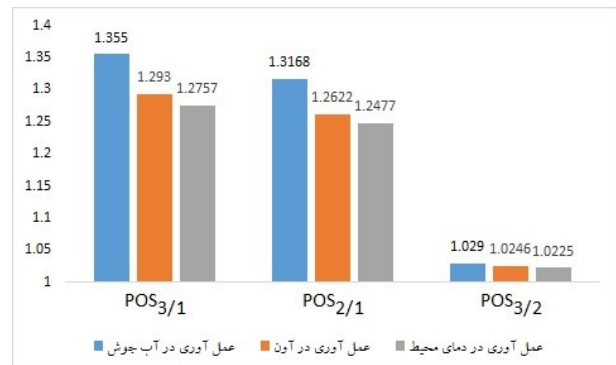
نسبت های مقاومت Pull-Off به دست آمده از نمونه های عمل آوری شده در آب جوش و اوون به نمونه های عمل آوری شده در دمای محیط  $POS(BW/A)$  و  $POS(O/A)$  در شکل های ۱۹ تا ۲۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که: الف) با افزایش ضخامت دیسک از ۱ سانتی متر به ۳ سانتی متر، ب) با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم از ۸ به ۱۲ مول در لیتر و ج) با جایگزینی ۲۰ درصد از وزن سرباره کوره آهن گدازی با پودر ژئولیت طبیعی نسبت های  $POS(BW/A)$  و  $POS(O/A)$  افزایش می یابند.

آلومینیومی به ترتیب برابر ۱،۱۶۴ و ۱،۴۰۹ می باشد. شهیدزاده عربانی [۲۰] نشان داد که در بتن معمولی، نسبت  $POS_{3/1}$  حاصل از دیسک فولادی و آلومینیومی به ترتیب برابر ۱،۲۷۱ و ۱،۷۲ می باشد.

اکبری معاف [۱۹] به این نتیجه رسید که نسبت  $POS_{2/1}$ ،  $POS_{3/1}$  و  $POS_{3/2}$  برای بتن خودتراکم حاوی لیکا به ترتیب برابر ۱،۱۷۹، ۱،۱۳۶ و ۰،۹۶۳ می باشد. علاوه بر این نشان داد که این نسبت ها برای بتن خودتراکم حاوی اسکوریا به ترتیب برابر با ۱،۱۶۴، ۱،۱۰۸ و ۰،۹۵۲ می باشد.

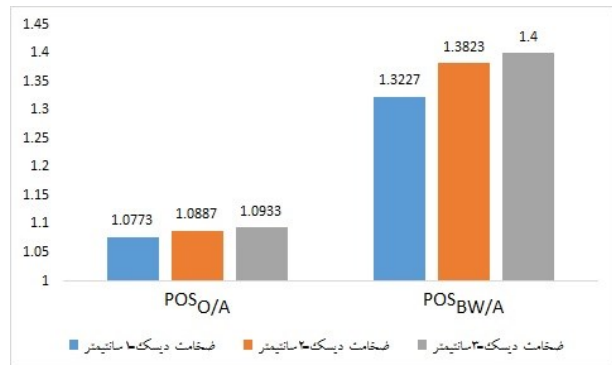
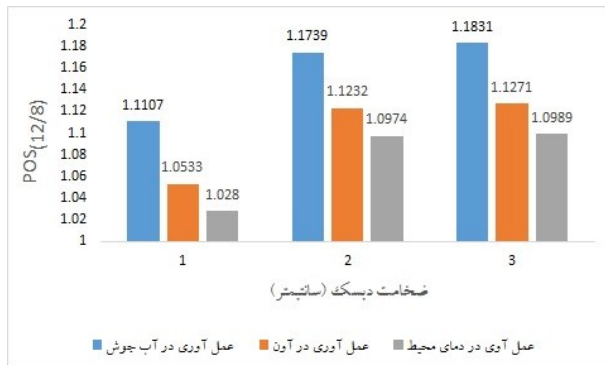


شکل ۱۵- مقادیر  $POS(3/2)$ ،  $POS(2/1)$  و  $POS(3/1)$  برای بتن ژئولیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر



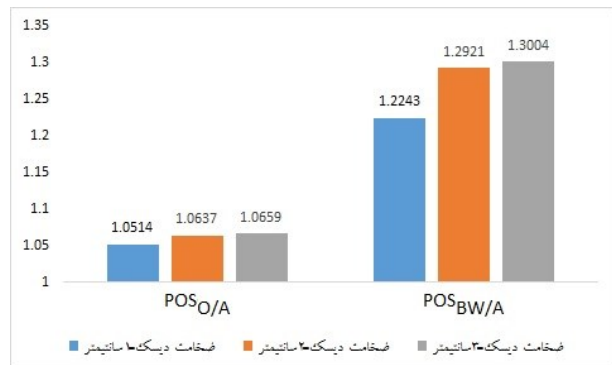
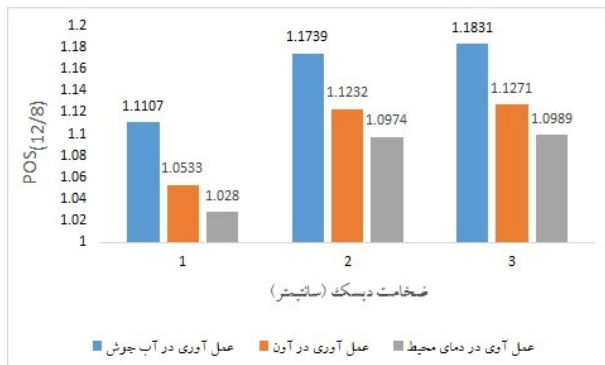
شکل ۱۶- مقادیر  $POS(3/2)$ ،  $POS(2/1)$  و  $POS(3/1)$  برای بتن ژئولیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مول در لیتر

بر اساس نتایج بدست آمده، مقادیر  $POS(3/2)$ ،  $POS(2/1)$  و  $POS(3/1)$  برای نمونه های عمل آوری شده در آب جوش، بیش تر از نمونه های عمل آوری شده در اوون است. علاوه بر این، این نسبت ها برای نمونه های عمل آوری شده در اوون بیش تر از نمونه های عمل آوری شده در دمای محیط است. مطابق نتایج



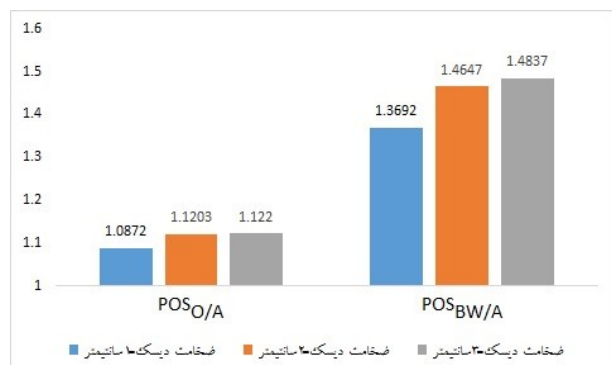
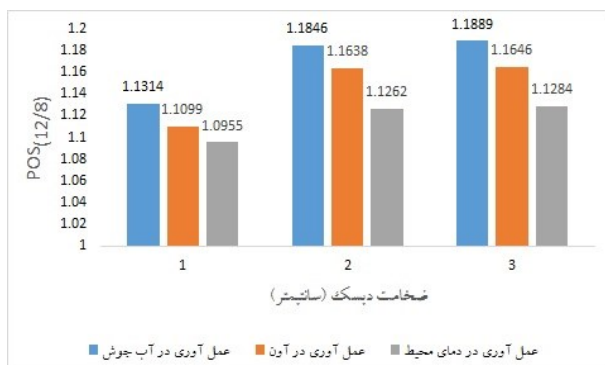
شکل ۲۲-نسبت های  $POS(O/A)$  و  $POS(BW/A)$  برای دیسک با ضخامت مختلف و بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مول در لیتر

شکل ۱۹-نسبت های  $POS(O/A)$  و  $POS(BW/A)$  برای دیسک با ضخامت مختلف و بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر



شکل ۲۳-نسبت  $POS(12/8)$  بدست آمده از دیسک با ضخامت مختلف در بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی عمل آوری شده در شرایط مختلف

شکل ۲۰-نسبت های  $POS(O/A)$  و  $POS(BW/A)$  برای دیسک با ضخامت مختلف و بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مول در لیتر



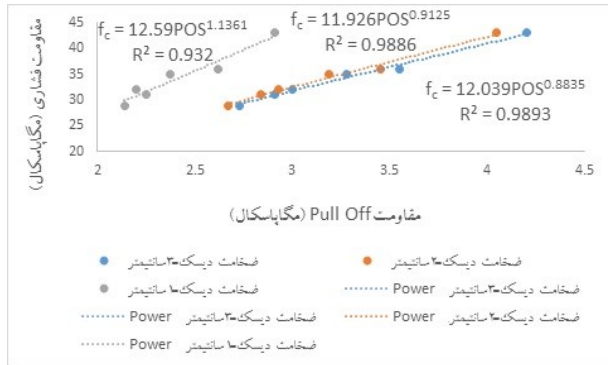
شکل ۲۴-نسبت  $POS(12/8)$  بدست آمده از دیسک با ضخامت مختلف در بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی عمل آوری شده در شرایط مختلف

شکل ۲۱-نسبت های  $POS(O/A)$  و  $POS(BW/A)$  برای دیسک با ضخامت مختلف و بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر

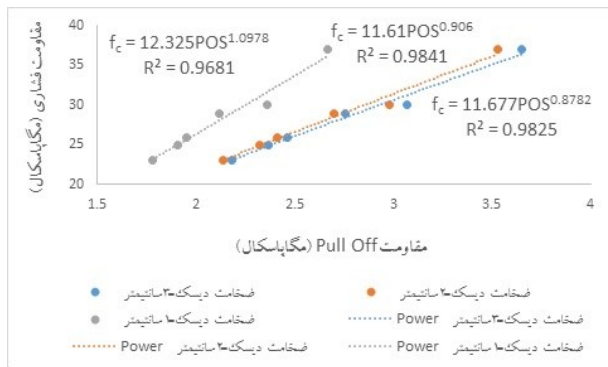
الف) نسبت  $POS(12/8)$  برای نمونه های عمل آوری شده در آب جوش بیشتر از نمونه های عمل آوری شده در اوون است، ب) این نسبت برای نمونه های عمل آوری شده در اوون بیشتر از نمونه های

نسبت های  $POS(12/8)$  برای نمونه های مختلف در شکل ۲۳ و ۲۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که:

رابطه بین مقاومت فشاری ( $f_c$ ) و مقاومت Pull-Off نمونه‌های مختلف بتن در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ و جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲۷- نمودار مقاومت فشاری-مقاومت Pull-Off بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی برای دیسک‌های با ضخامت مختلف



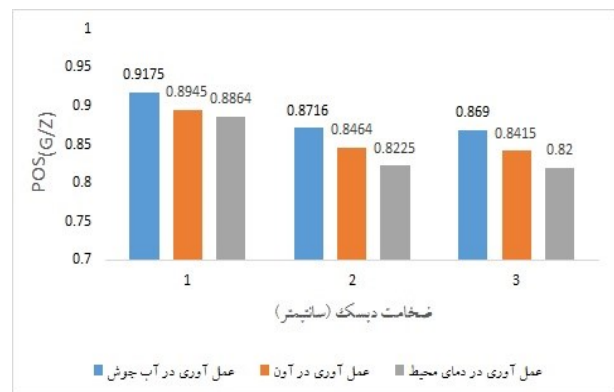
شکل ۲۸- نمودار مقاومت فشاری-مقاومت Pull-Off بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی برای دیسک‌های با ضخامت مختلف

جدول ۳- ارتباط بین مقاومت فشاری-مقاومت Pull-Off

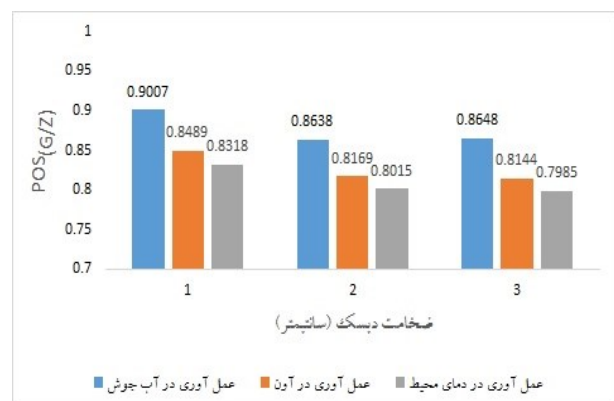
رابطه	ضخامت دیسک (سانتی‌متر)	نوع بتن
$f_c = 12.59POS^{1.1361}$	۱	ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی
$f_c = 11.926POS^{0.9125}$	۲	ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی
$f_c = 12.039POS^{0.8835}$	۳	ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی
$f_c = 12.325POS^{1.0978}$	۱	ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی
$f_c = 11.61POS^{0.906}$	۲	ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی
$f_c = 11.677POS^{0.8782}$	۳	ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی

عمل آوری شده در دمای محیط است. (ج) نسبت  $POS(12/8)$  با افزایش ضخامت دیسک افزایش می‌یابد و (د) نسبت  $POS(12/8)$  با جایگزینی ۲۰ درصد از وزن سرباره کوره آهن گدازی با پودر زئولیت طبیعی افزایش می‌یابد.

مقادیر  $POS(GZ/G)$  برای نمونه‌های مختلف در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که: الف) نسبت  $POS(GZ/G)$  برای نمونه‌های عمل آوری شده در آب جوش، بیشتر از نمونه‌های عمل آوری شده در اوون است. علاوه بر این، این نسبت‌ها برای نمونه‌های عمل آوری شده در اوون بیشتر از نمونه‌هایی است که در دمای محیط عمل آوری شده‌اند، ب) نسبت  $POS(GZ/G)$  با افزایش ضخامت دیسک کاهش می‌یابد و ج) با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم. از ۸ به ۱۲ مول در لیتر، نسبت  $POS(GZ/G)$  افزایش می‌یابد.



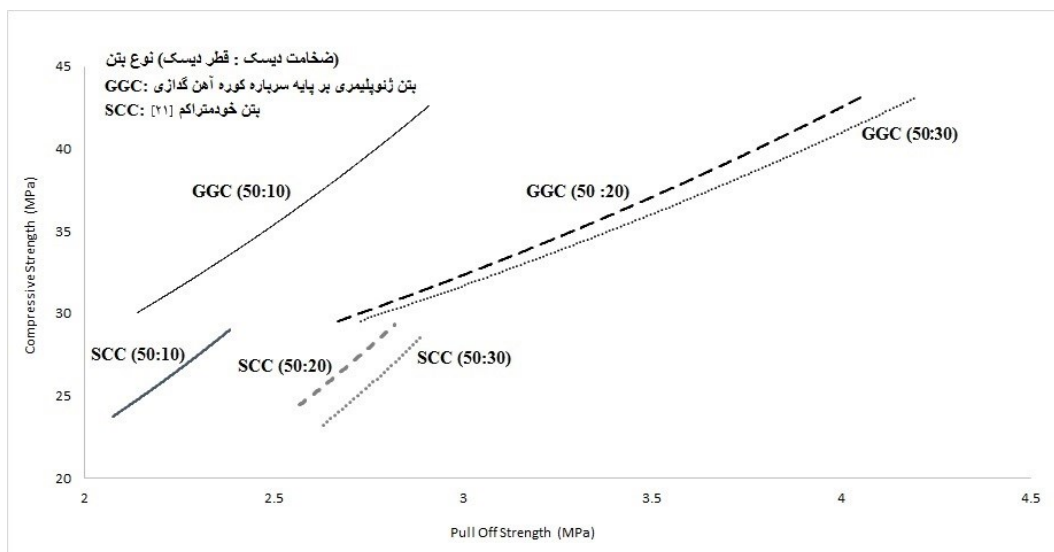
شکل ۲۵- نسبت  $POS(GZ/G)$  دیسک با ضخامت مختلف برای نمونه‌های حوای محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مول در لیتر عمل آوری شده در شرایط مختلف



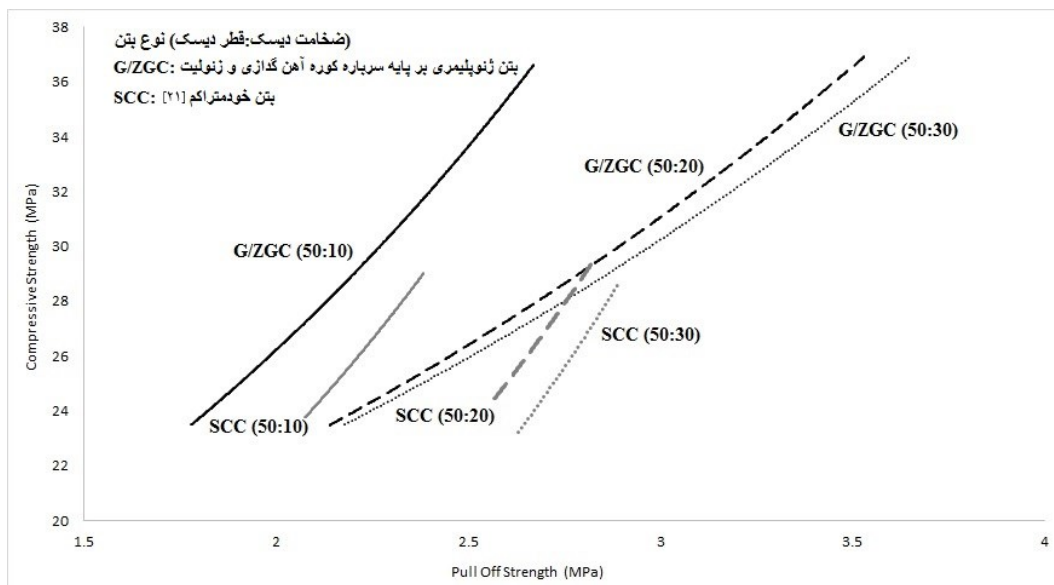
شکل ۲۶- نسبت  $POS(GZ/G)$  دیسک با ضخامت مختلف برای نمونه‌های حوای محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مول در لیتر عمل آوری شده در شرایط مختلف

پرتلند معمولی متفاوت است. این تفاوت ناشی از تفاوت در مشخصات بتن ژئوپلیمری و بتن بر پایه سیمان پرتلند معمولی می باشد. عواملی مانند تفاوت در مشخصات ریزساختاری، مشخصات شکست، میزان چسبندگی سنگ دانه و خمیر، میزان چسبندگی دیسک فولادی و سطح بتن، میزان تخلخل و ... در بتن های مذکور موجب تفاوت در تاثیر ضخامت دیسک در نتایج حاصل از آزمایش Pull-Off بتن ژئوپلیمری و بتن خودمتراکم بر پایه سیمان پرتلند معمولی شده است.

رابطه بین مقاومت فشاری-مقاومت Pull-Off بتن های مورد مطالعه شامل بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی، بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی/پودر زئولیت طبیعی و بتن خودمتراکم بر پایه سیمان پرتلند معمولی مورد مطالعه توسط قويدل [۲۱] بدست آمده از دیسک های به قطر ۵ سانتیمتر و ضخامت های ۱، ۲ و ۳ سانتیمتر در شکل های ۲۹ و ۳۰ نشان داده شده است. ملاحظه می گردد که تاثیر ضخامت دیسک بر مقاومت Pull-Off بتن های مورد مطالعه و بتن خودمتراکم بر پایه سیمان



شکل ۲۹- تأثیر ضخامت دیسک در نمودار مقاومت فشاری - مقاومت Pull-Off بتن ژئوپلیمری GGC و بتن خود متراکم SCC

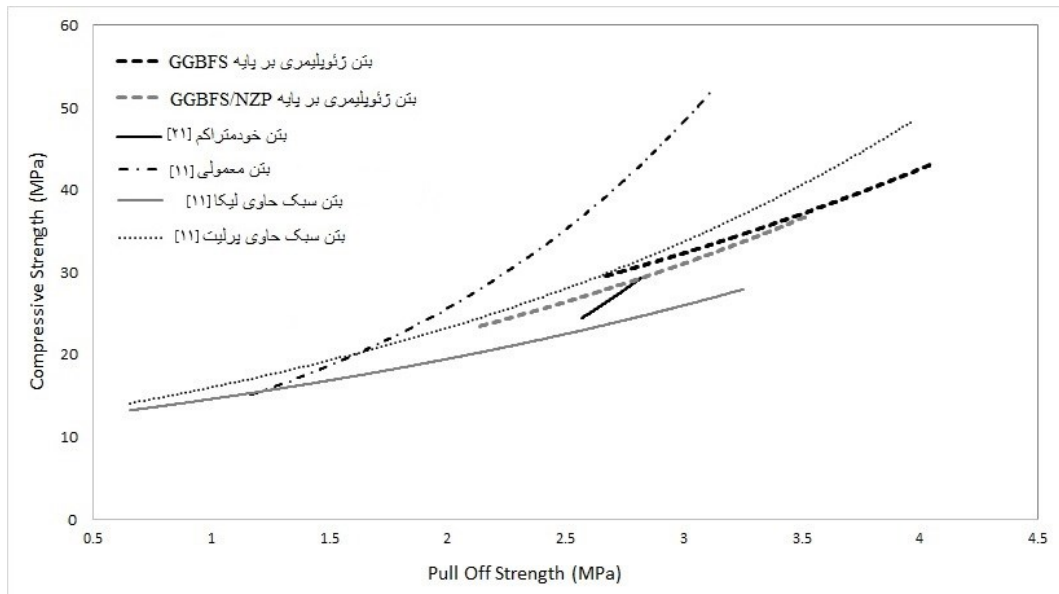


شکل ۳۰- تأثیر ضخامت دیسک در نمودار مقاومت فشاری-مقاومت Pull-Off بتن ژئوپلیمری G/ZGC و بتن خود متراکم SCC

خودمتراکم [۲۱]، بتن معمولی، بتن سبک حاوی لیکا و بتن سبک حاوی پرلیت [۱۱] بدست آمده از دیسک فولادی به قطر ۵ سانتیمتر

نمودار مقاومت فشاری - مقاومت Pull-Off بتن های ژئوپلیمری مورد مطالعه و بتن های بر پایه سیمان پرتلند معمولی شامل بتن

و ضخامت ۲ سانتیمتر در شکل ۳۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که نمودار مقاومت فشاری-مقاومت Pull-Off بتن ژئوپلیمری با بتن‌های بر پایه سیمان پرتلند معمولی متفاوت است. که نشان‌دهنده تاثیر نوع بتن در نتایج آزمایش Pull-Off می‌باشد. بنابراین در تعیین مقاومت فشاری بتن با استفاده از روش Pull-Off باید از منحنی کالیبراسیون مختص هر بتن استفاده نمود.



شکل ۳۱- مقایسه نمودار مقاومت فشاری - مقاومت Pull-Off بتن‌های ژئوپلیمری مورد مطالعه و انواع دیگر بتن

#### ۴- نتیجه گیری

تغییرات مقاومت Pull-Off با ضخامت دیسک، با افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید تندتر می‌شود. (ج) شیب تغییرات در نمونه‌های بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی کم‌تر از نمونه‌های بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی/پودر زئولیت طبیعی است و (د) مقادیر تقریباً مساوی از مقاومت Pull-Off از دیسک‌های با ضخامت‌های ۲ و ۳ سانتی‌متر به دست آمده است.

- با افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید، مقادیر مقاومت Pull-Off افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج: الف) شیب تغییرات مقاومت Pull-Off با غلظت سدیم هیدروکسید، با افزایش ضخامت دیسک افزایش می‌یابد. ب) شیب تغییرات مقاومت Pull-Off با غلظت سدیم هیدروکسید در بتن ژئوپلیمری ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی/پودر زئولیت طبیعی بیش‌تر از بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی است. و (د) بیش‌ترین و کم‌ترین میزان افزایش مقاومت Pull-Off با غلظت سدیم هیدروکسید به ترتیب مربوط به نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب جوش و دمای محیط می‌باشد.

- جایگزینی ۲۰ درصد از وزن سرباره کوره آهن‌گدازی با پودر زئولیت طبیعی منجر به کاهش مقادیر مقاومت Pull-Off می‌

در این مقاله، اثر روش عمل‌آوری، غلظت محلول سدیم هیدروکسید و ضخامت دیسک بر مقاومت Pull-Off بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی و بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی/پودر زئولیت طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج اصلی بدست آمده در مقاله حاضر عبارتند از:

- بیش‌ترین مقادیر مقاومت Pull-Off از نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب جوش و کمترین آن از نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای محیط بدست می‌آمده است. بر اساس نتایج بدست آمده، نسبت‌های POS(BW/A) و POS(O/A): الف) با افزایش ضخامت دیسک افزایش می‌یابد. ب) با افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید، افزایش می‌یابد. و ج) برای بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی/پودر زئولیت طبیعی بیش‌تر از بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی است.

- با افزایش ضخامت دیسک، مقاومت Pull-Off افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج بدست آمده: الف) بیشترین شیب تغییرات مقاومت Pull-Off با ضخامت دیسک به ترتیب مربوط به نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب جوش، اوون و دمای محیط می‌باشد. ب) شیب

& Professional: an imprint of Chapman & Hall.

[10] Neville, A.M., (1995), Properties of concrete, fourth ed., London, Longman.

[11] Madandoust, R., (1990), Strength Assessment of Lightweight Concrete, Ph.D. Thesis, University of Liverpool.

[12] Austin, S., Robins, P., Pan, P., (1995), Tensile bond testing of concrete repairs, Materials and Structures, 28, 249-259.

<https://doi.org/10.1007/BF02473259>

[13] Bungey, J.H., Madandoust, R. (1994), Evaluation of non-destructive strength testing of lightweight concrete. Proc. ICE, Structs & Bldgs, 104, Aug., 275-283.

<https://doi.org/10.1680/istbu.1994.26778>

[14] Malhotra, V.M., Carino, N.J. (Eds.), (2004), Handbook on Nondestructive Testing of Concrete: Second Edition, CRC Press LLC, ASTM International.

[15] Bonaldo, E., Barros, J.A.O., Lourenco, P.B., (2005), Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off testing, International Journal of Adhesion & Adhesives 25, 463-

474. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.01.002>

[16] Bungey, J.H., Madandoust, R., (1989), Insitu strength assessment of lightweight concrete, IABSE Symposium, Lisbon, 847-852.

[17] Vaysburd, A.M., McDonald, J.E., (1999), An Evaluation of Equipment and Procedures for Tensile Bond Testing of Concrete Repairs, Technical Report REMR-CS-61, Prepared for Headquarters, U.S. Army Corps of Engineers.

[18] Weerheijm J. "Understanding the Tensile Properties of Concrete", 2013, London: Woodhead Publishing Limited: 19-51.

[19] اکبری معاف، امیرحسین. (۱۳۹۸). ارزیابی روش Pull Off

برای تعیین مقاومت بتن خودتراکم سبک حاوی لیکا و اسکوریا.

پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت نشا- زیباکنار.

[20] شهیدزاده عربانی، اکبر. (۱۳۹۸). بررسی پارامترهای موثر بر

آزمایش نیمه مخرب Pull Off. پایان نامه کارشناسی ارشد.

دانشگاه گیلان.

[21] Ghavidel, R., Madandoust, R., & Ranjbar, M. M. (2015). Reliability of pull-off test for steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Measurement*, 73, 628-639.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.013>

[22] BS EN 1542, (1999), Products and systems for the repair of concrete structures – Test methods –

شود. بر اساس نتایج: الف) میزان کاهش مقاومت Pull-Off در اثر جایگزینی ۲۰ درصد از وزن سرباره کوره آهن گدازی با پودر ژئولیت طبیعی، با افزایش ضخامت دیسک افزایش می یابد. ب) میزان کاهش مقاومت Pull-Off در اثر جایگزینی ۲۰ درصد از وزن سرباره کوره آهن گدازی با پودر ژئولیت طبیعی، با افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید کاهش می یابد و د) حداکثر و حداقل میزان کاهش در مقاومت Pull-Off مربوط به نمونه های عمل آوری شده در دمای محیط و آب جوش است.

## ۵- مراجع

[1] Montgomery, F.R., Long, A.E., Basheer, P.A.M., (1989), Assessing surface properties of concrete by in-situ measurements, proceedings IABSE Symposium, Durability of structures, Lisbon, 871-876.

[2] British Standard BS 1881: Part 207. Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests; 1992.

[3] ASTM C1583/C1583M-13. Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (Pull-off method). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials; 2013.

[4] Long AE, Murray A. The pull-off partially destructive test for concrete. Proceedings of International Conference on In-situ/Non-Destructive Testing of Concrete, ACI SP-82; American Concrete Institute 1984: 327-350.

[5] Y. Bai, P.A.M. Basheer, D.J. Cleland, State of the art applications of the pull-off test in civil engineering, Int. J. Struct. Eng. 1 (1) (2009) 93-103.

[6] Bungey, J.H., Madandoust, R., (1992), Factors influencing pull-off tests on concrete, Magazine of Concrete Research, 44, No. 158, 21-30.

<https://doi.org/10.1680/mac.1992.44.158.21>

[7] Bungey, JH, Soutsos, MN., (2001), Reliability of partially-destructive tests to assess the strength of concrete on site. Constr Build Mater; 15(2-3):81-92. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00057-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00057-X)

[8] Ramos, N.M.M. , Simões, M.L., Delgado, J.M.P.Q., Freitas, V.P., (2012), Reliability of the pull-off test for in situ evaluation of adhesion strength, Construction and Building Materials 31, 86-93.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.097>

[9] Bungey, J.H., Millard, S.G., (1996), Testing of concrete in structures, third ed., Blackie Academic

- temperatures: a comparative study. *Journal of Building Engineering*. 2016 Dec 1;8:123-30. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.10.005>
- [33] Chithambaram SJ, Kumar S, Prasad MM. Study on Effect of Sodium Hydroxide Concentration on Geopolymer Mortar. *In Sustainable Construction and Building Materials* 2019 (pp. 651-658). Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3317-0\\_58](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3317-0_58)
- [34] Ruiz-Santaquiteria C, Skibsted J, Fernández-Jiménez A, Palomo A. Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates. *Cement and Concrete Research*. 2012 Sep 1;42(9):1242-51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.05.019>
- [35] Fang G, Ho WK, Tu W, Zhang M. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*. 2018 May 30;172:476-87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.008>
- [36] McDonald M, Thompson JL. Sodium silicate a binder for the 21st century. *National silicates and PQ Corporation of Industrial Chemicals Division*. 2006:1-6.
- [37] Sun Z, Vollpracht A, van der Sloot HA. pH dependent leaching characterization of major and trace elements from fly ash and metakaolin geopolymers. *Cement and Concrete Research*. 2019 Nov 1;125:105889. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105889>
- [38] Aliabdo AA, Elmoaty AE, Salem HA. Effect of cement addition, solution resting time and curing characteristics on fly ash based geopolymer concrete performance. *Construction and building materials*. 2016 Oct 1;123:581-93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.043>
- [39] Mermerdaş K, Algin Z, Oleiwi SM, Nassani DE. Optimization of lightweight GGBFS and FA geopolymer mortars by response surface method. *Construction and Building Materials*. 2017 May 15;139:159-71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.050>
- [40] محمدی فتیده، رنجبر & ملک محمد. (۲۰۲۱). ارزیابی زمان گیرش و مقاومت فشاری خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره کوره آهنگدازی و ژئولیت. *نشریه مهندسی سازه و ساخت*-8(2), 177-187.
- [41] Erfanimanesh, A., & Sharbatdar, M. K. (2020). Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer paste, mortar, and concrete containing local zeolite and slag activated by sodium Measurements of bond strength by pull-off. *British Standards Institution, London*.
- [23] Jindal BB. Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review. *Construction and Building Materials*. 2019 Dec 10;227:116644. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.025>
- [24] Cao X, Li X, Zhu Y, Zhang Z. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China. *Journal of cleaner production*. 2015 Dec 16;109:131-43. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.120>
- [25] Bernal SA, de Gutiérrez RM, Pedraza AL, Provis JL, Rodriguez ED, Delvasto S. Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement and concrete research*. 2011 Jan 1;41(1):1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.017>
- [26] Singh B, Ishwarya G, Gupta M, Bhattacharyya SK. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*. 2015 Jun 15;85:78-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- [27] Reddy MS, Dinakar P, Rao BH. A review of the influence of source material's oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2016 Nov 1;234:12-23. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.07.005>
- [28] Manjunath R, Narasimhan MC. An experimental investigation on self-compacting alkali activated slag concrete mixes. *Journal of Building Engineering*. 2018 May 1;17:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.01.009>
- [29] Saha S, Rajasekaran C. Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*. 2017 Aug 15;146:615-20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.139>
- [30] Wang Y, Liu X, Zhang W, Li Z, Zhang Y, Li Y, Ren Y. Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of Cleaner Production*. 2020 Jan 20;244:118852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118852>
- [31] Bondar D, Lynsdale CJ, Milestone NB, Hassani N, Ramezani-pour AA. Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*. 2011 Feb 1;33(2):251-60. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.021>
- [32] Hosan A, Haque S, Shaikh F. Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated



- properties and durability of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 240-245.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.005>
- [53] ASTM C33. (2003). ASTM C33 standard specifications for concrete aggregates. *ASTM Standard Book*.
- [54] ASTM, A. (2018). C39/C39M-18. *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete*, *ASTM International*.
- [55] Peng, Y.; Guo, R.; Lin, Z.; Zhang, M. (2021). Review on influencing factors of mechanical properties of fly ash geopolymer. *B. Chin. Ceram. Soc.* 40, 858–866.
- [56] Adam, A. A., & Horianto, X. X. X. (2014). The effect of temperature and duration of curing on the strength of fly ash based geopolymer mortar. *Procedia engineering*, 95, 410-414.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.199>
- [57] Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (1999). Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and concrete research*, 29(10), 1619-1625.  
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00143-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00143-X)
- [58] Altan, E., & Erdoğan, S. T. (2012). Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 131-139.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.003>
- [59] Jia, Y., Zhang, Y., & Zhang, W. (2009). Preparation, properties and mechanism of slag based geopolymer. *J. Wuhan Univ. Techno*, 31, 120-125.
- [60] Hadi, M. N., Farhan, N. A., & Sheikh, M. N. (2017). Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 140, 424-431.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.131>
- [61] Olivia M, Nikraz H. Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design* (1980-2015). 2012 Apr 1;36:191-8.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.036>
- [62] Aliabdo AA, Elmoaty AE, Salem HA. Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance. *Construction and Building Materials*. 2016 Sep 15;121:694-703.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.062>
- [63] De Sensale GR. Strength development of concrete with rice-husk ash. *Cement and concrete composites*. 2006 Feb 1;28(2):158-60.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.005>
- [64] Papa, E., Medri, V., Amari, S., Manaud, J., carbonate. *Journal of Building Engineering*, 32, 101781.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101781>
- [42] Değirmenci, F. N. (2018). Utilization of natural and waste pozzolans as an alternative resource of geopolymer mortar. *International Journal of Civil Engineering*, 16(2), 179-188.  
<https://doi.org/10.1007/s40999-016-0115-1>
- [43] Nurrudin, M. F., Sani, H., Mohammed, B. S., & Shaaban, I. (2018). Methods of curing geopolymer concrete: a review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 5(1), 31-36. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2018.01.005>
- [44] Adam, A. A., & Horianto, X. X. X. (2014). The effect of temperature and duration of curing on the strength of fly ash based geopolymer mortar. *Procedia engineering*, 95, 410-414.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.199>
- [45] Nuruddin, M. F., Malkawi, A. B., Fauzi, A., Mohammed, B. S., & Al-Mattarneh, H. M. (2016). Effects of alkaline solution on the microstructure of hcfa geopolymers. In *Engineering Challenges for Sustainable Future-Proceedings of the 3rd International Conference on Civil, offshore and Environmental Engineering, ICCOEE* (Vol. 2016).
- [46] Yewale, V. V., Shirsath, M. N., & Hake, S. L. (2016). Evaluation of efficient type of curing for geopolymer concrete. *Evaluation*, 3(8).
- [47] Yunsheng, Z., Wei, S., Qianli, C., & Lin, C. (2007). Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer. *Journal of hazardous materials*, 143(1-2), 206-213.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.033>
- [48] Kong, L., Fan, Z., Ma, W., Lu, J., & Liu, Y. (2021). Effect of Curing Conditions on the Strength Development of Alkali-Activated Mortar. *Crystals*, 11(12), 1455.  
<https://doi.org/10.3390/cryst11121455>
- [49] Nasr, D., Pakshir, A. H., & Ghayour, H. (2018). The influence of curing conditions and alkaline activator concentration on elevated temperature behavior of alkali activated slag (AAS) mortars. *Construction and Building Materials*, 190, 108-119.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.099>
- [50] Aydın, S., & Baradan, B. (2012). Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars. *Materials & design*, 35, 374-383. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.005>
- [51] Altan, E., & Erdoğan, S. T. (2012). Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 131-139.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.003>
- [52] Chi, M. (2012). Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the

Benito, P., Vaccari, A., & Landi, E. (2018). Zeolite-geopolymer composite materials: Production and characterization. *Journal of cleaner production*, 171, 76-84.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.270>.

## Investigation of the Pull-Off Strength of Geopolymer Concrete Containing GGBFS and Natural Zeolite Powder

Seyed Ahmad Vaziri\*

Department of Civil Engineering, University Campus 2, University of Guilan, Rasht, Iran.

Rahmat Madandoust

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Malek Mohammad Ranjbar Taklimi

### Abstract

In this paper, effects of curing methods (i.e. curing at ambient temperature (A), in oven (O) and in boiling water (BW)), NaOH solution concentration (i.e. 8 and 12 moles/liter) and disc thickness (i.e. 1, 2 and 3 cm) on pull-off strength (POS) of the geopolymer concrete containing Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and Natural Zeolite Powder (NZZ) have been investigated. The results show that the value of the POS obtained from the 3 cm thickness disc is on average 2.6% higher than that obtained from the 2 cm thickness disc. This implies that the discs with thicknesses of 2 and 3 cm have given approximately equal values of the POSs. Moreover, the value of the POS obtained from the 2 cm thickness disc is on average 28.4% higher than that obtained from the 1 cm thickness one. Based on the results obtained from the 2 cm thickness disc: a) the ratios of the POSs of the samples cured in boiling water and oven to that of the specimen cured at ambient temperature have been obtained on average equal to 1.383 and 1.089, respectively. b) as 20% wt. of the GGBFS is substituted by the NZZ, the value of the POS reduces by an average of 16.29%. c) as the NaOH solution concentration increases from 8 to 12 mole/liter, the value of the POS increases by an average of 14.48%. From the results, there is a strong nonlinear relationship between the compressive and pull-off strengths of the geopolymer concrete.

**Keywords:** pull-off test, geopolymer concrete, disc thickness, curing method, boiling water, oven, NaOH solution concentration.

---

\* Corresponding Author: vazirijoon@gmail.com

