

The Environmental Resistance of Low-Carbon Geopolymer Concret, A Review Article

Gholamreza Havaei^{1*}, SeyedAli Mohseni²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Ph.D. student, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Geopolymer is a new type of inorganic cementitious material developed in recent years, enabling the reuse of solid industrial waste and significantly reducing energy consumption and greenhouse gas emissions. It is considered an eco-friendly alternative to Ordinary Portland Cement (OPC). This paper compares the environmental resistance performance of geopolymer concrete and cement-based concrete in terms of resistance to chemical attacks (acid and salt), chloride ion penetration, carbonation, freeze-thaw, and alkali-aggregate reactions. The findings show that geopolymer concrete has superior resistance to chemical attacks, chloride ion penetration, and freeze-thaw cycles, but lower resistance to carbonation and alkali-aggregate reactions compared to cement-based concrete. Changes in precursor materials lead to differences in durability performance and failure mechanisms. The failure mechanisms of geopolymer concrete are primarily attributed to dissolved hydration products, expansive products, cracks, and increased porosity. These results highlight the potential for using geopolymer concrete in harsh environments. The paper also suggests several opportunities and challenges for future studies on its durability.

ARTICLE INFO

Receive Date: 26 September 2024

Revise Date: 02 December 2024

Accept Date: 04 January 2025

Keywords:

Geopolymer concrete
concrete
concrete durability
environment

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525693.3738>

*Corresponding author: Gholamreza Havaei
Email address: Havaei@aut.ac.ir

مقاومت در برابر عوامل محیطی بتن ژئوپلیمر کم کربن، مقاله مروری

غلامرضا هوایی^{۱*}، سیدعلی محسنی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

ژئوپلیمر نوع جدیدی از مواد سیمانی غیرآلی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته و امکان استفاده مجدد از منابع پسماند صنعتی جامد را فراهم می‌آورد. همچنین مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. ژئوپلیمر به‌عنوان جایگزینی دوستدار محیط‌زیست برای سیمان پرتلند معمولی (OPC) شناخته شده است. این مقاله عملکرد مقاومت در برابر عوامل محیطی بتن ژئوپلیمر و بتن مبتنی بر سیمان را از نظر مقاومت در برابر حملات شیمیایی (مانند حملات اسیدی و نمکی)، مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلرید، مقاومت در برابر کرناسیون، مقاومت در برابر یخ‌زدان و ذوب، و واکنش قلیایی-سنگدانه مقایسه و خلاصه می‌کند. به‌طور کلی نتیجه‌گیری می‌شود که بتن ژئوپلیمر مقاومت بهتری در برابر حملات شیمیایی، مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلرید و مقاومت در برابر یخ‌زدان نشان می‌دهد، اما مقاومت کمتری در برابر کرناسیون و واکنش قلیایی-سنگدانه نسبت به بتن مبتنی بر سیمان دارد. به‌طور قابل توجهی، تغییرات در مواد پیش‌ساز منجر به تفاوت‌هایی در عملکرد دوام و مکانیسم‌های خرابی برای انواع مختلف بتن ژئوپلیمر می‌شود. مکانیسم‌های خرابی بتن ژئوپلیمر تحت این حملات محیطی عمدتاً به محصولات هیدراته حل شده، محصولات انبساطی تشکیل شده، ترک‌های تولید شده و افزایش تخلخل نسبت داده می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که بتن ژئوپلیمر پتانسیل استفاده‌های ارزشمند در سناریوهای خاص، به‌ویژه در محیط‌های خشن را داراست. در نهایت، چندین فرصت و چالش بالقوه برای مطالعات آینده در زمینه دوام بتن ژئوپلیمر پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمر، بتن، دوام بتن، محیط زیست

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525693.3738	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۳/۱۰/۱۵	۱۴۰۳/۱۰/۱۵	۱۴۰۳/۰۹/۱۲	۱۴۰۳/۰۷/۰۵
			* نویسنده مسئول:		
			پست الکترونیکی:		
			غلامرضا هوایی		
			Havaei@aut.ac.ir		

۱- مقدمه

سیمان پرتلند معمولی (OPC) رایج‌ترین و ضروری‌ترین ماده ساختمانی در مهندسی عمران است، در حالی که مصرف انرژی زیاد و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند روز به روز بیشتر برجسته می‌شود [۱-۳]. برآورد می‌شود که دی‌اکسید کربن منتشر شده از تولید سیمان ۵ تا ۸ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن انسانی را تشکیل می‌دهد [۴-۷]. بنابراین، توسعه مواد ساختمانی کم‌کربن به‌عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند به‌عنوان مسیری موثر برای کاهش مصرف انرژی و حداقل کردن انتشار CO₂ در نظر گرفته می‌شود.

اخیراً، ژئوپلیمرها یا مواد قلیایی فعال، نوعی جدید از مواد سیمانی غیر فلزی معدنی، توجه زیادی را به‌عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند در تولید بتن ژئوپلیمر جلب کرده‌اند [۸-۱۱]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بتن ژئوپلیمر مقاومت بالاتری در برابر حملات شیمیایی، مقاومت در برابر یخ‌زدگی و ذوب، و مقاومت در برابر دمای بالا نسبت به بتن‌های مبتنی بر سیمان دارد، که این ویژگی‌ها ناشی از محصولات هیدراتاسیون نسبتاً پایدار و میکروساختار متراکم‌تر ژئوپلیمرها نسبت به سیمان پرتلند است [۱۲-۱۵]. مواد قلیایی فعال یا ژئوپلیمرها نوعی ماده سیمانی هستند که در آن ضایعات جامد آلومینو سیلیکات منفرد یا ترکیبی با فعالیت پتانسیل پس از فعال‌سازی توسط محلول فعال‌کننده قلیایی خاصیت سخت‌شوندگی در آب نشان می‌دهند. [16-18]

از جمله فعال‌کننده‌های قلیایی معمول که استفاده می‌شوند می‌توان به قلیایات سوزاننده (MOH)، که در آن M می‌تواند Na یا K و غیره باشد، سیلیکات‌ها (M₂SiO₃)، آلومینات‌ها (M₂O·nAl₂O₃)، آلومینو سیلیکات‌ها (M₂O·nAl₂O₃·mSiO₂)، نمک‌های اسید ضعیف غیر سیلیکاتی) مانند M₂CO₃، M₂SO₃، و M₃PO₄ و نمک‌های اسید قوی غیر سیلیکاتی (M₂SO₄) اشاره کرد. [19-21]

علاوه بر این، ژئوپلیمرها از مواد معدنی آلومینو سیلیکات یا محصولات جانبی صنعتی (مانند خاکستر بادی، گنگ زغال‌سنگ، دود سیلیسی، سرباره و متاکاولین و غیره) تولید می‌شوند که نه تنها بازیافت منابع ضایعات جامد صنعتی را تحقق می‌بخشد، بلکه به طور موثری مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید سیمان پرتلند را کاهش می‌دهد. این امر باعث تحقق صرفه‌جویی در هزینه‌ها، صرفه‌جویی در انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و پایداری زیست‌محیطی سبز می‌شود که با استراتژی "کربن دوگانه" در چین هم‌راستا است. [22-24]

در مقابل مواد سیمانی مبتنی بر سیمان، سیستم‌های مختلف ژئوپلیمر دارای مکانیزم‌های ژئوپلیمریزاسیون، میکروساختارها، خواص مکانیکی و دوام متفاوتی هستند که ناشی از تنوع مواد اولیه (یعنی پیش‌ماده‌ها) است [۲۶-۲۸]. پیش‌ماده‌های ژئوپلیمر بر اساس محتوای کلسیم به دو نوع سیستم کم کلسیم و سیستم پر کلسیم تقسیم می‌شوند. این مواد آلومینو سیلیکات معمول در نمودار سه‌گانه SiO₂-Al₂O₃-CaO نشان داده شده است. برای سیستم‌های کم کلسیم (مانند گنگ زغال‌سنگ و خاکستر بادی)، ژئوپلیمرها نیاز به یک محیط قلیایی بسیار قوی برای فعال‌سازی دارند و محصول اصلی هیدراتاسیون آنها ژل‌های مشابه زولیت و سیلیکات آلومینیوم سدیم (N-A-S-H) است که یک چارچوب سه‌بعدی با اتصال تتراهدرال‌های سیلیکات و اکتاهدرال‌های آلومینات از طریق اتم‌های مشترک اکسیژن تشکیل می‌دهد. برای سیستم‌های پر کلسیم (مانند سرباره)، ژئوپلیمرها می‌توانند در محیط‌های قلیایی معتدل فعال شوند و محصول اصلی هیدراتاسیون آنها ژل‌های سیلیکات کلسیم آلومینیوم (C-(A)-S-H) با فرم‌های زنجیره‌ای و نسبت Ca/Si پایین است [۲۹-۳۱]. به طور کلی، هر دو نوع ژل می‌توانند در سیستم‌های ترکیبی ژئوپلیمر همزیستی داشته باشند. با افزایش محتوای کلسیم در پیش‌ماده، محصولات واکنشی ممکن است از ژل-N-A-S-H به ژل C-(A)-S-H تبدیل شوند که به بهبود چگالی ماتریس خمیر کمک می‌کند و خواص مکانیکی ماده چسبنده را افزایش می‌دهد، اما همچنین انقباض آن را نیز افزایش می‌دهد [۳۲، ۵]. علاوه بر این، افزایش محتوای کلسیم در پیش‌ماده آلومینو سیلیکات می‌تواند نرخ تشکیل ژل‌های N-A-S-H را افزایش دهد که به نوبه خود فرآیند درمان در دماهای محیطی را تسهیل می‌کند [۳۳]. این تفاوت در خواص همچنین تاثیر زیادی بر دوام بلندمدت بتن ژئوپلیمر و ساختارهای آن دارد.

در حال حاضر، تحقیقات مرتبط با عملکرد مبتنی بر دوام بتن ژئوپلیمر در میان محققان محبوبیت زیادی پیدا کرده است [۳۴-۳۷]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بتن ژئوپلیمر در مقایسه با بتن‌های مبتنی بر سیمان، دوام بسیار بهتری در محیط‌های تخریبی دارد

[۱۴،۳۸]. با این حال، به دلیل تنوع مواد پیش ماده و پیچیدگی عملکرد دوام، تحقیقات موجود در مورد دوام بتن ژئوپلیمر همچنان نسبتاً پراکنده است و از خلاصه سازی و طبقه بندی جامع دوام برای سیستم های مختلف بتن ژئوپلیمر بی بهره است.

بنابراین، این مقاله به طور سیستماتیک مطالعات مربوط به دوام بتن ژئوپلیمر را در پنج جنبه جمع بندی و بررسی می کند: مقاومت در برابر فرسایش شیمیایی (یعنی حملات اسیدی و نمکی)، مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید، مقاومت در برابر کربناتاسیون، مقاومت در برابر یخ زدگی و ذوب، و واکنش قلیایی-مجموعه. در همین حال، قانون تخریب و مکانیسم های آسیب بتن ژئوپلیمر و بتن مبتنی بر سیمان پس از حملات محیطی تجزیه و تحلیل و مقایسه شدند، که می تواند مراجع مفیدی برای تحقیقات بیشتر در زمینه توسعه و کاربرد بتن ژئوپلیمر در محیط های خورنده مختلف فراهم کند.

مقاومت در برابر حملات شیمیایی

2.1. حمله اسیدی

وقتی بتن برای مدت طولانی در معرض محیط های اسیدی قرار می گیرد، محیط خورنده به راحتی با مواد حاوی کلسیم) مانند Ca(OH)_2 و ژل های C-S-H در بتن واکنش می دهد، که باعث حل شدن محصولات هیدراتاسیون و تولید محصولات انبساطی (مانند گچ) می شود و سپس باعث تخریب حل شدگی و آسیب های مبتنی بر انبساط می گردد. این آسیب ها منجر به تخریب ساختار میکرو داخلی و ترک خوردگی یا پوسته پوسته شدن سطح بتن می شود که به شدت بر ظرفیت باربری و عمر مفید سازه های بتنی تأثیر می گذارد [۶،۳۹]. پس از حمله خوردگی در محیط های اسیدی، وزن و مقاومت بتن به تدریج با افزایش سن خوردگی کاهش می یابد [۴۰]. با این حال، بین مقاومت بتن ژئوپلیمر و بتن مبتنی بر سیمان در برابر حملات اسیدی و مکانیسم های تخریب تفاوت هایی وجود دارد که ناشی از تفاوت ها در نوع مواد اولیه (یعنی پیش ماده ها)، محصولات هیدراتاسیون و میکروساختارها است. مطالعات موجود تأیید کرده اند که بتن ژئوپلیمر مقاومت بهتری در برابر حملات اسیدی نسبت به بتن های مبتنی بر سیمان دارد [۱،۴۱]، همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است. دلیل اصلی این اتفاق را می توان به دو جنبه زیر نسبت داد (1): مواد مبتنی بر سیمان حاوی کلسیم بیشتری و محصولات هیدراتاسیون ناپایدار مانند Ca(OH)_2 ، اترینگیت (AFt)، و مونو سولفات (AFm) هستند که در معرض خوردگی در محلول های اسیدی قرار می گیرند. در حالی که محصولات اصلی واکنش های ژئوپلیمرها ژل های N-A-S-H، ژل های C-(A)-S-H و کریستال های مشابه ژئولیت هستند که فاقد Ca(OH)_2 هستند و بنابراین نسبت به محیط های اسیدی کمتر حساس اند. [42,43] (2) دوغاب ژئوپلیمر ساختار میکروسکوپی فشرده تری نسبت به دوغاب سیمان دارد که خوردگی محیط های خورنده خارجی داخل بتن را به تأخیر می اندازد. در عین حال، فعال کننده قلیایی باقی مانده (مانند Na_2SiO_3 و Na/KOH) در بتن می تواند از نفوذ اسید جلوگیری کند. [34,44]

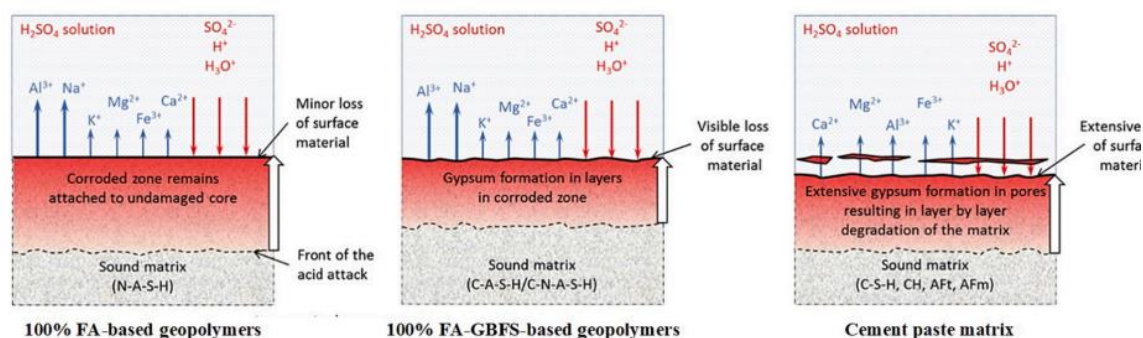
در محیط های مختلف اسیدی، مقاومت در برابر حملات اسیدی و مکانیسم های تخریب بتن ژئوپلیمر ممکن است تفاوت هایی داشته باشد. به طور کلی، مکانیسم های خوردگی بتن در معرض حل شدن محلول H_2SO_4 عمدتاً به دلیل حل شدن ژل های C-(A)-S-H و N-A-S-H و H تشکیل گچ انبساطی (CaSO_4) در ماتریس دوغاب است، در حالی که مکانیسم های تخریب بتن در معرض خوردگی محلول های اسیدی دیگر) مانند HCl عمدتاً به دلیل حل شدن ژل های N-A-S-H و C-(A)-S-H است و اساساً هیچ گونه تشکیل CaSO_4 مشاهده نمی شود [۴۵،۴۶]. حل شدن این محصولات هیدراتاسیون باعث افزایش تخلخل ماتریس دوغاب، ضعیف شدن ناحیه انتقال در interfaces دوغاب-سنگدانه و ترک خوردگی یا پوسته پوسته شدن بتن می شود که منجر به از دست دادن وزن و کاهش عملکرد بتن می گردد. [47]

شیه و همکاران [۴۸] تمایل به تخریب عملکرد بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی-سرباره و بتن مبتنی بر سیمان را در غلظت های مختلف محلول H_2SO_4 (pH = 1.1) و ۱.۶ و ۲.۰ (مقایسه کردند. گزارش شد که در زیر همان غلظت H_2SO_4 ، ضخامت لایه خوردگی، زبری و تخلخل بتن مبتنی بر سیمان به طور قابل توجهی بیشتر از بتن ژئوپلیمر بود، که نشان دهنده این است که مقاومت بتن ژئوپلیمر در برابر خوردگی اسید سولفوریک بسیار بهتر از بتن مبتنی بر سیمان است. پس از ۱۴۰ روز خوردگی در محلول H_2SO_4 با pH = 1.1، از دست دادن جرم و استحکام بتن ژئوپلیمر به ترتیب ۱۳.۱٪ و ۳۴.۵٪ بود، در حالی که بتن مبتنی بر سیمان به ترتیب ۲۰٪ و ۶۵.۱٪ از دست داد و این تخریب با افزایش غلظت اسید بیشتر شد [۴۹]. ساریدمیر و همکاران [۵۰] بیان کردند که از دست دادن جرم و استحکام بتن ژئوپلیمر مبتنی

بر سرپاره پس از قرار گرفتن در محلول HCl با غلظت ۱۰٪ (یعنی محلول HCl ۱۰٪) به مدت ۵۶ روز به ترتیب ۳.۶٪ و ۲۹.۰٪ بود، در حالی که این مقادیر در بتن ژئوپلیمر پس از قرار گرفتن در محلول ۲۰٪ HCl به مدت ۵۶ روز به ترتیب ۸.۹٪ و ۳۷.۴٪ رسید. در مقایسه با بتن ژئوپلیمر، بتن مبتنی بر سیمان تحت همان شرایط خورنده از دست دادن استحکام بیشتری نشان داد (حدود ۵۲٪ بیشتر). پس از ۵۶ روز غوطه‌وری در محلول ۲۰٪ HCl، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرپاره از ۳۳.۲ مگاپاسکال به ۲۰.۵ مگاپاسکال کاهش یافت، در حالی که این مقدار در بتن مبتنی بر سیمان از ۲۹.۶ مگاپاسکال به ۱۲.۳ مگاپاسکال افت کرد.

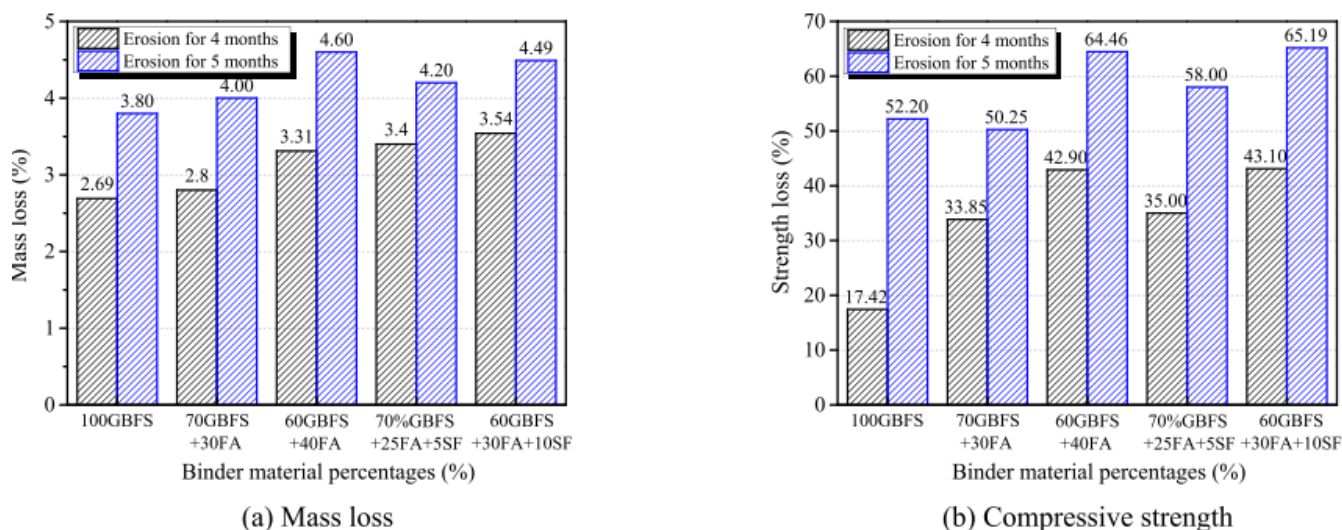
والنسیا-ساودرا و همکاران [۴۵] خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی-سرپاره را پس از غوطه‌وری در محلول H_2SO_4 و محلول اسید استیک در همان غلظت بررسی کردند و نشان دادند که از دست دادن استحکام بتن تحت حملات اسیدی تحت تأثیر نوع محلول اسیدی به‌طور قابل توجهی قرار نگرفته است. پس از حمله با محلول H_2SO_4 و محلول اسید استیک به مدت ۳۶۵ روز، از دست دادن استحکام بتن ژئوپلیمر به ترتیب ۶۵٪ و ۶۶٪ بود، در حالی که این مقادیر در بتن مبتنی بر سیمان به ترتیب ۹۵٪ و ۹۸٪ بود. علاوه بر این، آنها دریافتند که تشکیل گچ انبساطی در اثر خوردگی محلول H_2SO_4 مشاهده شد، در حالی که نمک بی‌کربنات سدیم در اثر خوردگی محلول اسید استیک تولید شد. میتا و همکاران [۴۹] تأثیرات افزودنی‌های مختلف سیمان (۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) بر مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی را تحلیل کردند و نشان دادند که افزودن سیمان باعث تقویت مقاومت فشاری بتن می‌شود اما مقاومت آن در برابر خوردگی اسید را تضعیف می‌کند. پس از قرار گرفتن در محلول ۲٪ H_2SO_4 به مدت ۱۲ ماه، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر با ۳۰٪ افزودنی سیمان از ۵۳.۶ مگاپاسکال به ۱۸.۰ مگاپاسکال کاهش یافت، با از دست دادن ۶۶.۴٪ استحکام، در حالی که همان مقدار برای بتن ژئوپلیمر بدون افزودنی سیمان از ۴۷.۳ مگاپاسکال به ۲۲.۸ مگاپاسکال کاهش یافت که تنها ۵۱.۸٪ از دست دادن استحکام را نشان می‌دهد. این اتفاق عمدتاً به این دلیل است که افزودن سیمان باعث افزایش محتوای کلسیم در سیستم سیمانی می‌شود و اکسید کلسیم در محلول H_2SO_4 واکنش می‌دهد تا محصولات انبساطی (مانند $CaSO_4$) تشکیل دهد که موجب تشدید تخریب محصولات هیدراتاسیون دوغاب و ترک خوردگی یا پوسته‌پوسته شدن بتن می‌شود. این مکانیسم‌های تخریب با مشاهدات مطرح شده توسط کاراسلان و همکاران [۴۲] که تأثیر سیمان آلومینات کلسیم بر مقاومت بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی در برابر اسید سولفوریک را ارزیابی کرده‌اند، همخوانی دارد.

شایان ذکر است که در مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر برای هر سیستم، تفاوت‌های زیادی وجود دارد که ناشی از تنوع انواع پیش‌ماده‌ها است (جدول ۱ را ببینید). به‌طور کلی، این باور وجود دارد که مقاومت بتن ژئوپلیمر در برابر حملات اسیدی با افزایش محتوای CaO در چسباننده کاهش می‌یابد که عمدتاً به نوع ژل‌ها در محصولات هیدراتاسیون مرتبط است، به طوری که مقاومت اسیدی ژل‌ها به ترتیب $C-S < C-A-S-H < N-A-S-H$ است [۴۵، ۵۲، ۵۳]. آیکن و همکاران [۵۱] اشاره کردند که افزایش محتوای سرپاره باعث بهبود ساختار منافذ و کاهش تخلخل می‌شود، اما افزایش محتوای کلسیم باعث تسریع تخریب محصولات هیدراتاسیون و تشکیل گچ انبساطی می‌شود که منجر به تشکیل تنش‌های داخلی در داخل بتن می‌شود، در نتیجه باعث ترک خوردگی یا پوسته‌پوسته شدن بتن می‌گردد. بنابراین، افزایش محتوای سرپاره باعث تضعیف واکنش‌های محصولات در برابر اسید سولفوریک می‌شود و مکانیسم‌های تخریب در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار شماتیک مکانیزم‌های حمله اسید سولفوریک در ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر پرواز، ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر پرواز و سرپاره، و ملات‌های مبتنی بر سیمان [51]

ساریدمیر و همکاران [۵۰] تأثیر افزودنی خاکستر بادی را بر مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرپاره ارزیابی کردند. این کشف شد که افزودن خاکستر بادی منجر به تشکیل ساختارهای پایدارتر فریم آلومینو سیلیکات و افزایش مقاومت بتن در برابر حملات اسیدی شد. پس از ۵۶ روز حمله در محلول ۱۲٪ HCl، از دست دادن جرم بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرپاره و بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرپاره- خاکستر بادی با ۵۰٪ افزودن خاکستر بادی به ترتیب ۸.۹٪ و ۲.۲٪ بود، در حالی که از دست دادن استحکام آنها به ترتیب ۳۷.۴٪ و ۱۱.۷٪ بود. برعکس، الیامانی و همکاران [۵۴] نتیجه گرفتند که افزودن دود سیلیس و خاکستر بادی برای مقاومت بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرپاره در برابر خوردگی اسید مضر است (شکل ۴). ترکیب افزودنی دود سیلیس و خاکستر بادی باعث افزایش تخلخل و جذب آب بتن می‌شود و به تشکیل گچ و اترینگیت کمک می‌کند که برای ثبات مقاومت اسیدی بتن مضر است. پس از حمله توسط محلول H₂SO₄ با pH = 0.6 به مدت ۵ ماه، از دست دادن جرم بتن ژئوپلیمر با ۱۰٪ دود سیلیس و ۳۰٪ خاکستر بادی از ۳.۸٪ به ۴.۵٪ افزایش یافت، در حالی که از دست دادن استحکام آن از ۵۲.۲٪ به ۶۵.۲٪ رسید، در مقایسه با بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرپاره کامل.



شکل ۴- تأثیرات دود سیلیس و خاکستر پرواز بر وزن و استحکام بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرپاره تحت حملات محلول H₂SO₄ [54]

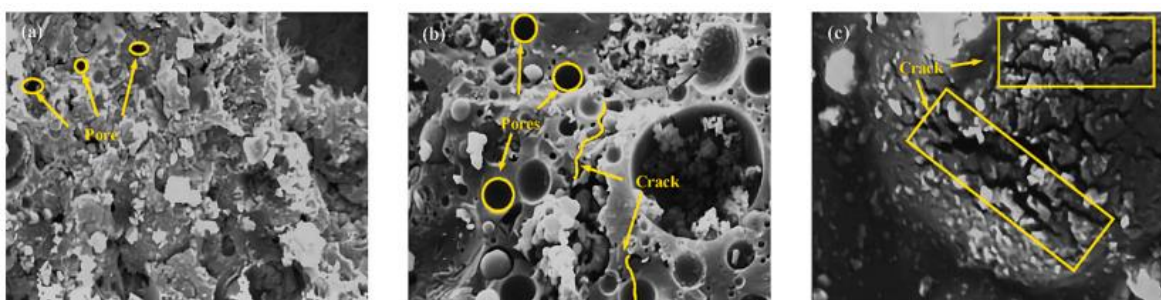
علاوه بر این، اوکویه و همکاران [۵۵] تأثیر دود سیلیس را بر مقاومت بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی در برابر محلول H₂SO₄ ارزیابی کردند و نشان دادند که افزودنی دود سیلیس باعث افزایش محتوای ژل‌های N-A-S-H در محصولات هیدراتاسیون و کاهش از دست دادن استحکام و جرم شد. سطوح مختلف تخریب عملکرد برای بتن‌های ژئوپلیمر مختلف تحت حملات محلول H₂SO₄ ممکن است به توزیع‌های مختلف اندازه منافذ و نرخ‌های حل شدن مواد اولیه مربوط باشد [۵۶]. پرادهان و همکاران [۵۴] مقاومت بتن‌های ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، متاکائولین، و خاکستر پایین را در برابر محلول‌های HCl و H₂SO₄ مقایسه کردند و دریافتند که بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی تحت شرایط مشابه بالاترین مقاومت فشاری و مقاومت در برابر اسید را به دست آورد، در حالی که بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر پایین کمترین مقاومت فشاری و مقاومت در برابر محلول اسیدی را داشت. ترتیب مقاومت اسیدی بتن به شرح زیر بود: خاکستر بادی < متاکائولین < خاکستر پوسته برنج < خاکستر پایین^۱.

¹ bottom ash.

شایان ذکر است که مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر همچین با نوع قلیایی، نوع سنگدانه و شرایط عمل‌آوری مرتبط است [۵۷]. ما و همکاران [۵۸] تأثیرات مختلف فعال‌کننده‌های قلیایی (NaOH)، Na_2SiO_3 ، و مخلوطی از محلول Na_2SiO_3 و NaOH را بر مقاومت بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی در برابر محلول H_2SO_4 مقایسه کردند و گزارش دادند که بتن ژئوپلیمر فعال‌شده توسط مخلوطی از محلول Na_2SiO_3 و NaOH ساختار شبکه سه‌بعدی آمورف پایدارتر و بهتری تولید کرده است که باعث افزایش مقاومت مکانیکی و مقاومت در برابر حملات اسیدی می‌شود.

در همین حال، تیموری و همکاران [۵۹] اشاره کردند که در مقایسه با بتن ژئوپلیمر فعال‌شده توسط مخلوطی از محلول KOH و Na_2SiO_3 ، بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره که با مخلوطی از محلول NaOH و Na_2SiO_3 فعال شده است، از دست دادن جرم و استحکام کمتری داشته و مقاومت بهتری در برابر محلول‌های HCl و H_2SO_4 از خود نشان داده است. پس از ۱۸۰ روز غوطه‌وری در محلول H_2SO_4 با pH = 3، از دست دادن جرم و استحکام بتن ژئوپلیمر فعال‌شده توسط محلول KOH + Na_2SiO_3 به ترتیب ۳۴٪ و ۶.۲٪ بیشتر از بتن ژئوپلیمر فعال‌شده توسط محلول NaOH + Na_2SiO_3 بود و این کاهش جرم و استحکام به تدریج با افزایش نسبت محلول قلیایی به محتوای سرباره افزایش یافت. [60]

علاوه بر این، فو و همکاران [۳۸] اشاره کردند که با استفاده از محلول NaOH به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی، آسیب بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی پس از قرار گرفتن در معرض محلول ۵٪ اسید استیک به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و تنها مقدار کمی تخلخل وجود داشت، در حالی که آسیب نمونه‌ها زمانی که از محلول Na_2SiO_4 و مخلوطی از محلول‌های KOH و NaOH استفاده شد، افزایش یافت، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است.



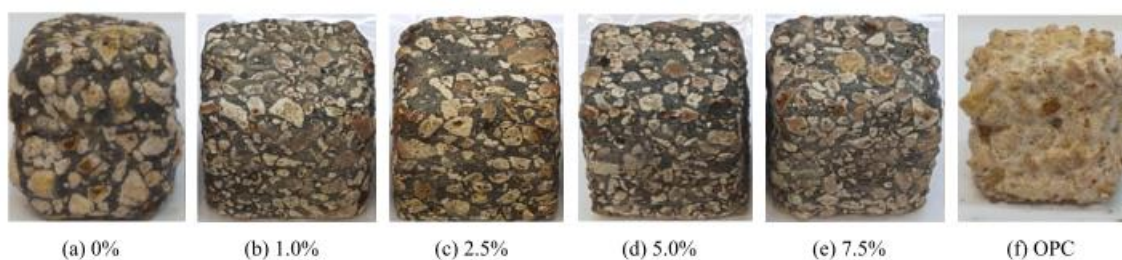
شکل ۵- ریزساختارهای بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر پرواز تهیه‌شده توسط سه فعال‌کننده تحت حملات محلول اسید استیک ۵٪ (الف) NaOH؛ (ب) NaOH/KOH؛ (ج) Na_2SiO_4 [38].

سالونی و همکاران [۶۱] از ذرات لاستیک به‌عنوان سنگدانه ریز برای مطالعه مقاومت بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی در برابر محلول‌های HCl و H_2SO_4 با نرخ‌های جایگزینی مختلف ذرات لاستیک (۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) استفاده کردند و اعلام کردند که افزودن ذرات لاستیک نفوذپذیری بتن را افزایش داده اما مقاومت مکانیکی و اسیدی آن را تضعیف می‌کند. جذب آب بتن ژئوپلیمر با ۳۰٪ جایگزینی لاستیک و بدون لاستیک به ترتیب ۹.۴٪ و ۷.۵٪ بود، در حالی که از دست دادن استحکام آنها به ترتیب ۲۸.۲٪ و ۸.۸٪ بود زمانی که نمونه‌ها برای ۹۰ روز در محلول ۳٪ H_2SO_4 غوطه‌ور شدند. این عمدتاً به دلیل افزودن لاستیک است که باعث تضعیف استحکام پیوند در interfaces دوغاب-سنگدانه و افزایش تخلخل ماتریس دوغاب می‌شود، که منجر به تخریب میکروساختارها، عملکرد مکانیکی و مقاومت اسیدی بتن می‌گردد. [62,63]

در همین حال، پاتر و همکاران [۶۴] رفتار مقاومتی اسیدی سنگدانه‌های گرانیتی سیلیسی و دولومیت کلسیمی را بر روی بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی مقایسه کردند و بیان کردند که بتن ژئوپلیمر تهیه شده با سنگدانه‌های گرانیتی مقاومت بهتری در برابر حملات محلول‌های HCl و H_2SO_4 نسبت به بتن ژئوپلیمر ساخته‌شده با سنگدانه‌های دولومیتی از خود نشان داد. علاوه بر این، سونتیا

متکونگ و همکاران [۶۵] تأثیر دماهای عمل‌آوری (۲۸، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد) را بر مقاومت بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر آتشفشانی-لاتریت در برابر H_2SO_4 بررسی کردند. مشخص شد که عملکرد مکانیکی بتن در دماهای مختلف عمل‌آوری با افزایش سن خوردگی به تدریج کاهش می‌یابد. این کاهش عملکرد ممکن است به شکستن پیوندهای Si-O-Al/Si در ساختارهای شبکه ژئوپلیمر ناشی از حملات اسیدی نسبت داده شود [۶۶]. افزایش دمای عمل‌آوری باعث کاهش جذب آب و تخلخل بتن به دلیل افزایش درجه ژئوپلیمریزاسیون می‌شود که در نتیجه چگالی، عملکرد مکانیکی و دوام بتن تقویت می‌شود. پس از قرار گرفتن در معرض محلول‌های H_2SO_4 (pH = 1) به مدت ۹۰ روز، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن عمل‌آوری شده در ۲۸ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۵۰.۲٪، ۳۰.۶٪ و ۳۲.۲٪ کاهش یافت، در حالی که همان مقادیر برای بتن عمل‌آوری شده در ۶۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۴۰.۵٪، ۲۵.۵٪ و ۲۸.۴٪ تضعیف شد.

برای تقویت بیشتر مقاومت مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی اسید بتن، افزودن نانو مواد و افزودنی‌های زیستی به‌عنوان یک روش مؤثر شناخته شده است [۶۷-۶۹]. ابراهیم و همکاران [۶۷] تأثیرات مقادیر مختلف نانو SiO_2 (۱.۰٪، ۲.۵٪، ۵.۰٪ و ۷.۵٪) را بر مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر آتشفشانی ارزیابی کردند. مشخص شد که افزودن نانو SiO_2 می‌تواند به‌طور مؤثر میکروساختار ماتریس دوغاب را بهبود بخشد و تخلخل را کاهش دهد. در نتیجه رفتار مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی اسید بتن را تقویت کرده و این اثر بهبود با افزایش مقدار نانو SiO_2 به تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۶). هنگامی که بتن بدون نانو SiO_2 تحت حملات محلول ۵٪ H_2SO_4 برای ۹ ماه قرار گرفت، از دست دادن جرم و استحکام آن به ترتیب ۳۹٪ و ۵۸٪ بود، در حالی که بتن حاوی ۷.۵٪ نانو SiO_2 تنها به ترتیب ۲۰٪ و ۲۲٪ از دست دادن جرم و استحکام داشت.

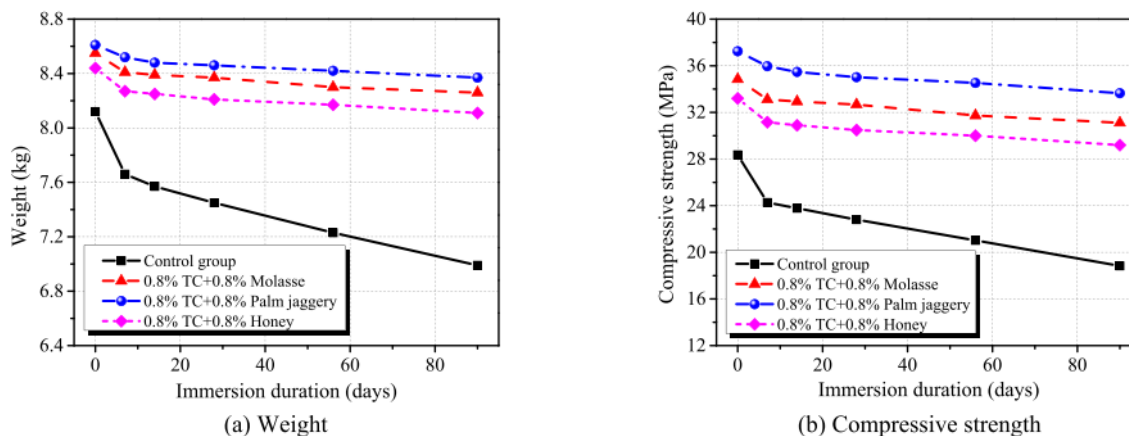


شکل ۶- نمای بتن ژئوپلیمر با محتوای مختلف نانو SiO_2 پس از قرارگیری در محلول H_2SO_4 به مدت ۶ ماه [67]

لیو و همکاران [۶۸] تأثیر مقادیر مختلف گرافن اکسید (۰.۰۱، ۰.۰۳ و ۰.۰۵ وزن درصد) را بر مقاومت اسید سولفوریک برای بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی بررسی کردند. مشاهده شد که مقدار کمی گرافن اکسید می‌تواند مقاومت اسیدی بتن را تقویت کند، اما این اثر بهبود با افزایش مقدار گرافن اکسید کاهش می‌یابد و بهترین اثر بهبود زمانی بود که مقدار گرافن اکسید ۰.۰۱ وزن درصد باشد.

علاوه بر این، کارتیک و همکاران [۶۹] نشان دادند که افزودنی‌های زیستی مانند ترمینالیا چپولا (TC) و شکرهای طبیعی (شکر خرما، شیر خرمای و عسل) باعث بهبود دوام بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی-سرباره در برابر حملات محلول H_2SO_4 شدند. پس از ۹۰ روز حمله محلول ۵٪ H_2SO_4 ، از دست دادن جرم و استحکام بتن ژئوپلیمر بدون افزودنی‌های زیستی به ترتیب ۱۳.۹۷٪ و ۳۳.۵۷٪ بود، در حالی که از دست دادن جرم بتن ژئوپلیمر با افزودن شیر خرمای، شکر خرما و عسل به ترتیب ۳.۴۷٪، ۲.۸۲٪ و ۳.۹۱٪ بود و از دست دادن استحکام آنها به ترتیب ۱۰.۷۱٪، ۹.۶۷٪ و ۱۲.۰۵٪ بود، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است. این افزایش مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر پس از افزودن افزودنی‌های زیستی ممکن است به دلیل حضور ساختار پلیمری متقاطع تثبیت شده باشد که واکنش شیمیایی اسید سولفوریک با کلسیم در ژل‌های ژئوپلیمر را محدود می‌کند و در نتیجه اثرات تخریب آن بر ساختارهای ژل ژئوپلیمرها را کاهش می‌دهد.

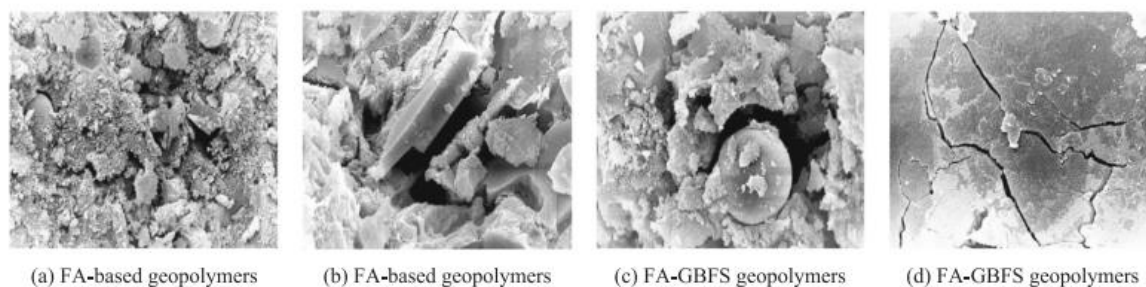
علاوه بر این، مقدادام و همکاران [۷۰] بیان کردند که افزودن الیاف فولادی در تقویت مقاومت فشاری و خمشی بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی مؤثر است، اما مقاومت اسیدی آن را تضعیف می‌کند. پس از ۹۰ روز خوردگی در محلول H_2SO_4 (pH = 1)، مقاومت فشاری بتن بدون الیاف ۲۴٪ کاهش یافت، در حالی که همان مقدار برای بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی به ۳۴٪ رسید.



شکل ۷- تغییرات در وزن و مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر تحت حملات اسید سولفوریک. [69]

از بحث‌های فوق‌الذکر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر بهتر از بتن مبتنی بر سیمان است، در حالی که مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر با سیستم پرکلسیم ضعیف‌تر از سیستم کم‌کلسیم است. دلیل اصلی این امر این است که ترکیبات کلسیمی به راحتی با اسید واکنش نشان می‌دهند که منجر به حل شدن در محصولات هیدراتاسیون و حتی تشکیل محصولات انبساطی می‌شود، که در نتیجه باعث تخریب میکروساختارها و ویژگی‌های مکانیکی می‌گردد [۳۴،۴۰]. علاوه بر این، مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر فعال شده با مخلوط Na_2SiO_3 و NaOH بهتر از بتن ژئوپلیمر فعال شده با محلول‌های منفرد KOH ، NaOH و Na_2SiO_3 است. در همین حال، مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر همچنین تحت تأثیر غلظت قلیایی، مقدار اسید و نوع سنگدانه قرار دارد، همانطور که در جدول ۱ جمع‌بندی شده است.

در تحقیقی [۹۱] نشان دادند که تخریب عملکرد بتن ژئوپلیمر تحت حملات محلول Na_2SO_4 عمدتاً به دلیل تشکیل گچ است، در حالی که تحت حملات محلول MgSO_4 عمدتاً به دلیل تشکیل اترینگیت می‌باشد. الیامانی و همکاران [۹۲] با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشاهده کردند که بلورهای گچ در بتن ژئوپلیمر پس از ۴۸ هفته قرارگیری در محلول ۱۰٪ MgSO_4 تشکیل شده و منجر به انبساط و ترک خوردگی موضعی شد، همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است. با این حال، کومار و همکاران [۷۵] نشان دادند که هرچند محصولات فرسایش بتن تحت حملات محلول MgSO_4 چسبندگی ضعیف و انبساطی دارند، مقاومت بتن در برابر حملات محلول MgSO_4 کمی کمتر از مقاومت آن در برابر حملات محلول Na_2SO_4 است. پس از ۲۴ هفته خوردگی تحت محلول‌های ۵٪ Na_2SO_4 ، ۵٪ MgSO_4 و ۱۵٪ NaCl ، از دست دادن استحکام بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی-سرباره به ترتیب ۱۶٪، ۶٪ و ۳٪ بود، در حالی که همین مقادیر برای بتن مبتنی بر سیمان به ترتیب ۱۸٪، ۱۴٪ و ۴٫۵٪ بود.



شکل ۸. میکروگراف‌های SEM بتن ژئوپلیمر قبل و بعد از ۴۸ هفته قرارگیری در محلول ۱۰٪ MgSO_4 [92]

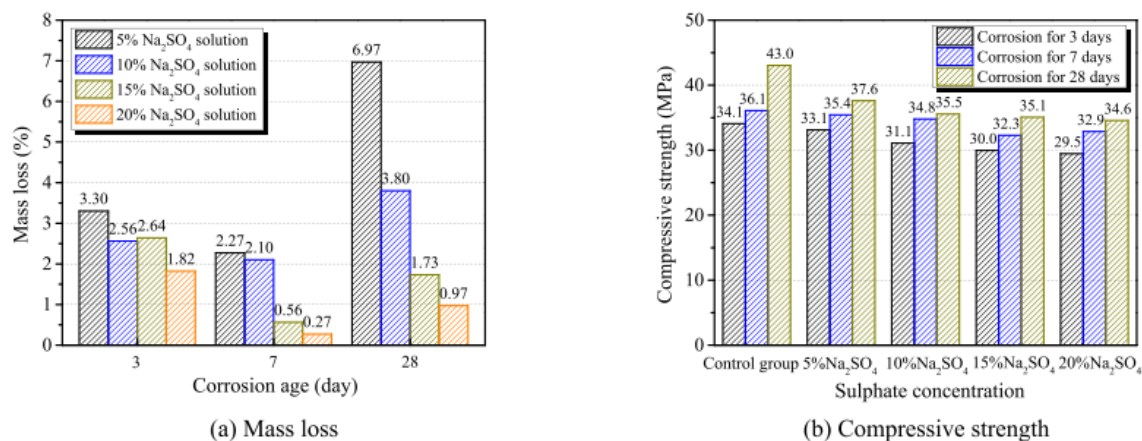
اوکان و همکاران [۸۸] تأثیرات محلول‌های Na_2SO_4 ، MgSO_4 ، NaCl و MgCl_2 (غلظت ۵٪) را بر از دست دادن جرم و مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره مقایسه کردند و گزارش دادند که تغییرات جرم بتن پس از فرسایش توسط محلول‌های خورنده نمکی مختلف ناچیز بود (تقریباً ۰٫۱٪)، اما از دست دادن استحکام آن قابل توجه بود و این عملکرد تخریب‌شده بتن به‌طور قابل توجهی بیشتر تحت

تأثیر فرسایش سولفات نسبت به فرسایش کلرید قرار گرفت. کاهش های ۲۱.۶٪، ۱۶.۴٪، ۳.۶٪ و ۴.۷٪ در مقاومت فشاری بتن به ترتیب پس از غوطه‌وری در محلول‌های MgSO_4 ، NaCl و MgCl_2 به مدت ۱۲ ماه مشاهده شد.

به دلیل تنوع گونه‌های پیش‌ماده، مقاومت بتن ژئوپلیمر انواع مختلف در برابر خوردگی نمک متفاوت است. به‌طور کلی، بتن ژئوپلیمر با کلسیم بالا مقاومت بهتری در برابر خوردگی نمک نسبت به بتن ژئوپلیمر با کلسیم کم نشان می‌دهد، عمدتاً به این دلیل که محصولات واکنش اصلی ژئوپلیمرهای با کلسیم بالا C-(A)-S-H است که به راحتی گچ و اترینگیت تولید می‌کند [۱]. چینداپراسیر و همکاران [۹۳] تأثیر افزودنی‌های سیمان و دود سیلیس را بر مقاومت در برابر فرسایش MgSO_4 در بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی بررسی کردند و نشان دادند که افزودنی‌های سیمان و دود سیلیس هر دو مقاومت فشاری بتن را افزایش دادند اما مقاومت آن در برابر خوردگی نمک را ضعیف کردند. با افزایش افزودنی‌های سیمان، از دست دادن جرم و استحکام بتن به تدریج گسترش یافت. پس از ۱۲۰ روز حمله محلول MgSO_4 ، از دست دادن جرم و استحکام بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی با ۱۵٪ افزودنی سیمان به ترتیب حدود ۰.۵ و ۲.۲ برابر افزایش یافت، در حالی که همین مقادیر برای بتن با ۵٪ افزودنی دود سیلیس به ترتیب ۱.۴ و ۵.۷ برابر افزایش یافت، مقایسه با گروه کنترل (بدون افزودنی سیمان و دود سیلیس). دلیل اصلی این امر این است که افزودنی‌های سیمان محتوای کلسیم را افزایش داده و واکنش دکلسیفیکاسیون محصولات هیدراتاسیون را تسریع می‌کنند، در حالی که افزودنی دود سیلیس باعث تخریب پیوند Si-O-Si و همچنین تشکیل اترینگیت می‌شود.

با این حال، شیه و همکاران [۹۴] اشاره کردند که افزودن مقدار مناسب خاکستر بادی در بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره باعث کاهش محتوای کلسیم در مواد سیمانی می‌شود که در نتیجه تشکیل محصولات انبساطی (مانند اترینگیت) کاهش یافته و پس از حملات محلول‌های نمک کمی تأثیر فرسایشی محلول نمک بر بتن را به تأخیر می‌اندازد. علاوه بر این، اوکویه و همکاران [۵۵] اشاره کردند که افزودن دود سیلیس به بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی باعث بهبود مقاومت آن در برابر حملات نمک کلرید به دلیل کاهش تخلخل شد. زمانی که مقدار افزودنی دود سیلیس از ۰٪ به ۲۰٪ تغییر کرد، از دست دادن جرم بتن از ۴۰٪ به ۲.۸٪ کاهش یافت، در حالی که از دست دادن استحکام بتن از ۷.۲٪ به ۰.۳٪ کاهش یافت، پس از غوطه‌وری در محلول ۵٪ NaCl به مدت ۹۰ روز. این نرخ تخریب در عملکرد بتن زمانی که غلظت محلول نمک افزایش یافت، تسریع شد.

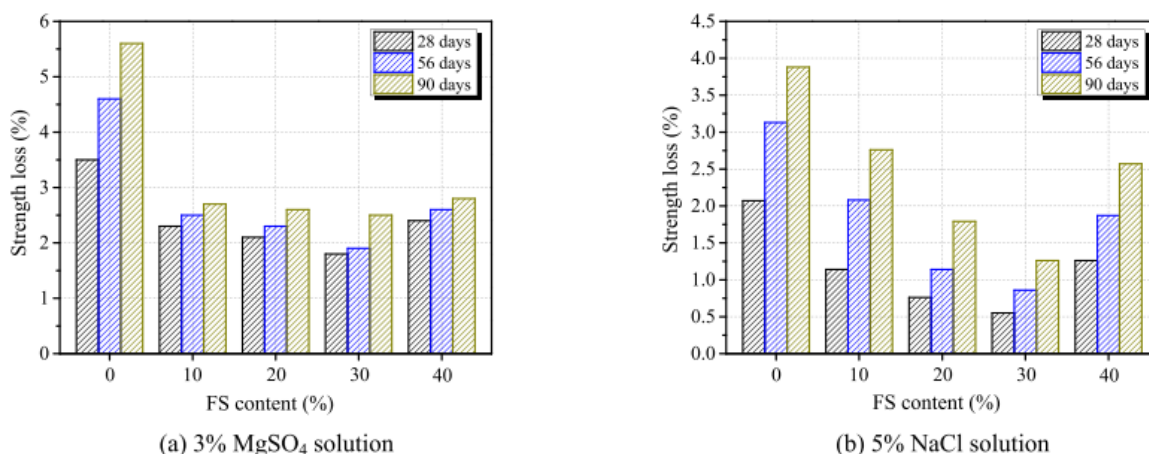
کارا کوچ و همکاران [۹۵] تأثیر غلظت‌های محلول MgSO_4 را بر ویژگی‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره بررسی کردند و نشان دادند که از دست دادن استحکام بتن‌های مبتنی بر سیمان و بتن ژئوپلیمر از ۷.۰٪ و ۸.۰٪ به ۳۱.۰٪ و ۲۵.۲٪ افزایش یافت، هنگامی که دوز محلول MgSO_4 از ۳.۰٪ به ۷.۰٪ تغییر کرد. با این حال، جرم بتن با افزایش غلظت محلول نمک تمایل به افزایش داشت که ممکن است به دلیل تشکیل اترینگیت و گچ باشد که منافذ سطحی و داخلی نمونه‌ها را پس از فرسایش پر کرد. فن و همکاران [۹۶] نتیجه‌گیری کردند که تأثیر فرسایش سولفات بر استحکام بتن ژئوپلیمر عمدتاً بر منافذ ماتریس و توسعه ترک‌ها متمرکز است. در مقایسه با شرایط خوردگی سولفات با غلظت کم، ترک‌ها و منافذ بیشتری در بتن ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولین تحت خوردگی سولفات با غلظت بالا ایجاد شد که منجر به کاهش استحکام بتن شد. زمانی که غلظت محلول Na_2SO_4 از ۵٪ به ۲۰٪ افزایش یافت، از دست دادن استحکام بتن پس از قرار گرفتن در معرض محلول نمک برای ۲۸ روز از ۱۲.۵٪ به ۱۸.۳٪ افزایش یافت، در حالی که از دست دادن جرم آن از ۶.۹٪ به ۱.۴٪ کاهش یافت، همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- تأثیر غلظت Na₂SO₄ و سن خوردگی بر جرم و مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر [96]

علاوه بر این، مقاومت در برابر فرسایش نمک بتن ژئوپلیمر نیز به نوع سنگدانه مورد استفاده بستگی دارد. پارت هیبان و همکاران [۹۷] ادعا کردند که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی به جای منابع سنگدانه‌های معمولی برای مقاومت در برابر فرسایش نمک بتن ژئوپلیمر مضر است. پس از ۹۰ روز خوردگی در محلول ۵٪ Na₂SO₄ و ۵٪ MgSO₄، از دست دادن استحکام بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره با سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۱۰.۶٪ و ۱۴.۳٪ رسید، در حالی که این مقادیر برای بتن بدون سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۵.۹٪ و ۶.۱٪ بود، که عمدتاً به این دلیل است که ملات متصل به سنگدانه‌های بازیافتی به راحتی با سولفات واکنش داده و محصولات گچ و اترینگیت را تشکیل می‌دهد که منجر به تخریب عملکرد بتن می‌شود. [57,98]

جنا و همکاران [۹۹] از سرباره فرومکرو (FS) به عنوان سنگدانه درشت استفاده کردند و تأثیرات نسبت‌های مختلف جایگزینی FS را بر دوام بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی تحت حملات محلول‌های ۳٪ MgSO₄ و ۵٪ NaCl بررسی کردند. مشخص شد که از دست دادن استحکام بتن ژئوپلیمر تحت حملات سولفات بیشتر از حملات کلرید بود. افزودن FS از دست دادن استحکام بتن را کاهش داد و بتن ژئوپلیمر با ۳۰٪ FS ویژگی‌های دوام بهتری نشان داد، همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقاومت بتن ژئوپلیمر در برابر حملات محلول نمک نیز به شرایط عمل‌آوری بستگی دارد. چی و همکاران [۱۰۰] تأثیرات عمل‌آوری هوایی، عمل‌آوری با آب آهک اشباع‌شده و عمل‌آوری در اتاق محیطی با دمای بالا (RH = 80٪، T = 60 درجه سانتی‌گراد) را بر دوام بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره تحت سیکل‌های خشک‌شدن و مرطوب‌شدن محلول Na₂SO₄ مقایسه کردند. مشخص شد که بتن ژئوپلیمر عمل‌آوری شده در اتاق محیطی با دمای بالا عملکرد مکانیکی و مقاومت به حملات نمک سولفات بهتری داشت، که از بتن ژئوپلیمر عمل‌آوری شده در هوای آزاد و آب آهک اشباع‌شده پیروی می‌کند.



شکل ۱۰- کاهش‌های مقاومت بتن ژئوپلیمر با محتویات مختلف FS تحت حملات سولفات و کلرید. [99]

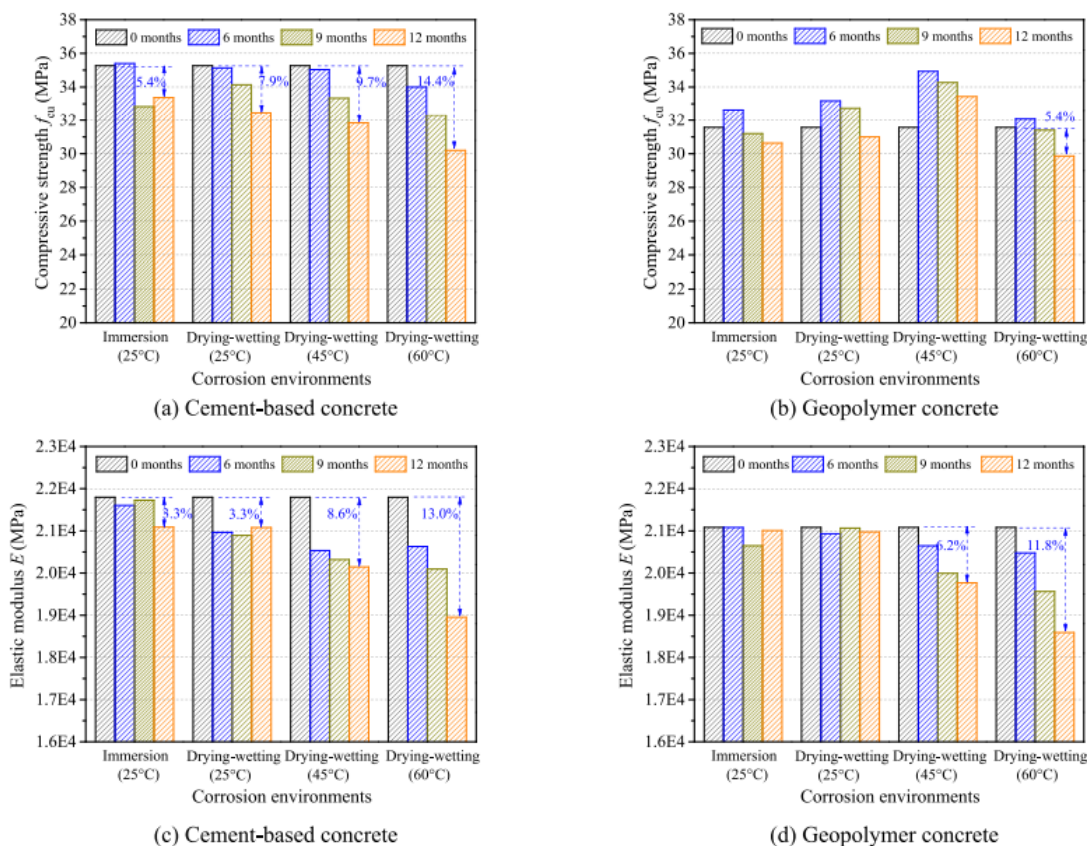
علاوه بر این، مطالعات مرتبط در نظر گرفته‌اند که افزودن نانو مواد و الیاف به منظور بهبود ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت نمک بتن ژئوپلیمر مفید است. جین و همکاران [۱۰۱] تأثیر افزودنی‌های نانو SiO_2 -را بر عملکرد مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی-متاکاولین تحت تأثیر محیط‌های رطوبت-حرارت و نمک کلرید) محلول ۵٪ NaCl بررسی کردند. نتیجه‌گیری شد که افزودن نانو مواد به طور مؤثر میکروساختار رابط دوغاب-سنگدانه را بهبود داده و تخلخل را کاهش می‌دهد، که به نوبه خود ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت در برابر فرسایش نمک بتن را تقویت می‌کند. در مقایسه با گروه کنترل بدون نانو مواد، حداکثر افزایش‌های مقاومت کششی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن تحت تأثیر محیط‌های ترکیبی به ترتیب ۹۶٪، ۲۵۸٪ و ۱۷۲٪ بود. علاوه بر این، اعداد تأثیر ترک اولیه، استحکام تأثیر و خرابی نهایی بتن ژئوپلیمر به ترتیب ۱۰۹٪، ۱۲۲٪ و ۱۱۰٪ افزایش یافت، هنگامی که مقدار نانو SiO_2 به ۱۵٪ رسید.

کانتارسی و همکاران [۱۰۲] تأثیرات طول (۶ و ۸ میلی‌متر) و مقدار (۰٫۵٪، ۱٫۰٪ و ۱٫۵٪) الیاف پلی‌پروپیلن را بر مقاومت در برابر حملات سولفات برای بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره بررسی کردند. مطالعات آنها نشان داد که اثر پل زنی الیاف می‌تواند اتصال بین ماتریس دوغاب و رابط آن را تقویت کرده و توسعه ترک‌ها را بیشتر محدود کند [۹۶]، که به طور قابل توجهی عملکرد مکانیکی و مقاومت نمک بتن را بهبود می‌بخشد. این اثر بهبود بیشتر برای مقدار الیاف ۰٫۵٪ و طول الیاف ۶ میلی‌متر بود. پس از ۲۸ روز خوردگی در محلول ۵٪ MgSO_4 ، از دست دادن مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن با طول الیاف ۶ میلی‌متر و مقدار الیاف ۰٫۵٪ به ترتیب ۱۹٫۷٪ و ۴٫۹٪ بود، در حالی که همین مقادیر برای بتن بدون افزودنی الیاف به ترتیب ۴۶٫۲٪ و ۵۴٪ کاهش یافت، که نشان‌دهنده این است که مقاومت فشاری بیشتر تحت تأثیر محیط فرسایش نمک نسبت به مقاومت کششی است و افزودن الیاف در کاهش از دست دادن استحکام مؤثرتر بود.

نتایج مشابهی توسط ژانگ و همکاران [۱۰۳] بدست آمد که تأثیرات الیاف پلی‌وینیل الکل را بر ویژگی‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمر حاوی نانو SiO_2 -پس از قرارگیری در معرض محیط‌های نمک-رطوبت-گرمای بررسی کردند. مطالعات آنها گزارش دادند که افزودن الیاف پلی‌وینیل الکل در کاهش از دست دادن مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن ژئوپلیمر تحت محیط‌های ترکیبی نمک-رطوبت-گرمای مؤثر بود و این اثر بهبود زمانی بیشترین بود که محتوای الیاف پلی‌وینیل الکل ۰٫۴٪ بود [۱۰۴]. با این حال، گانسان و همکاران [۷۷] اشاره کردند که افزودن الیاف فولادی تأثیر کمی بر مقاومت بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی در برابر خوردگی سولفات داشت. زمانی که مقدار افزودنی الیاف در محدوده ۰٫۲۵٪-۱۰٪ بود، از دست دادن جرم و استحکام بتن به ترتیب حدود ۰٫۳٪ و ۱۲٫۶٪ بود، پس از قرار گرفتن در معرض محلول ۳٪ MgSO_4 برای ۶ ماه.

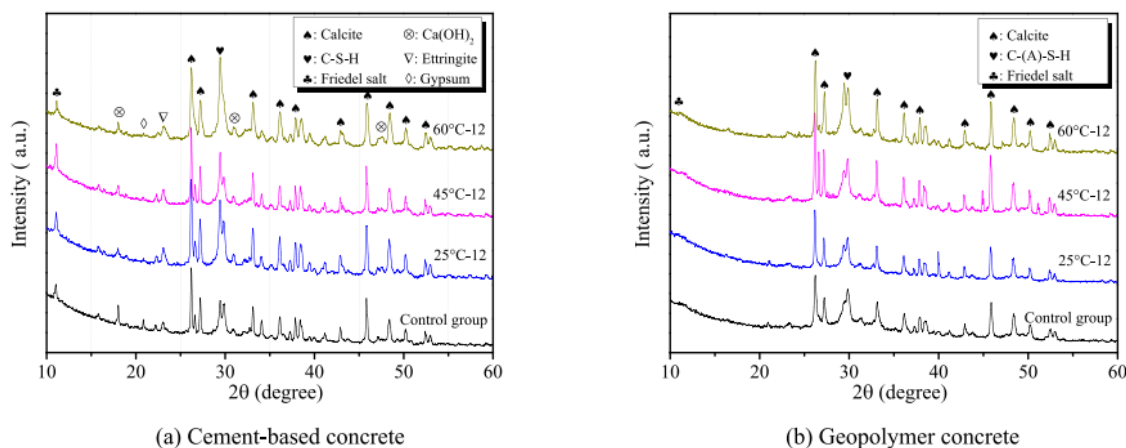
شایان ذکر است که مطالعات موجود عمدتاً بر عملکرد فرسایش بتن ژئوپلیمر در محیط‌های تک‌نمکی متمرکز شده است، در حالی که تحقیقات نسبتاً کمی در مورد مقاومت فرسایش نمک بتن ژئوپلیمر تحت تأثیرات ترکیبی چندین نمک انجام شده است [۱۰۵]. از جمله محیط‌های ترکیبی نمک، محیط‌های خوردگی آب دریا به‌عنوان نماینده‌های بارز شناخته می‌شوند [۳۴]. ردی و همکاران [۱۰۶] آزمایش‌های تسریع‌شده خوردگی را بر روی بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی با استفاده از آب دریا مصنوعی و جریان القایی انجام دادند و اعلام کردند که بتن ژئوپلیمر مقاومت فوق‌العاده‌ای در برابر فرسایش آب دریا داشته و زمان ترک خوردگی خوردگی طولانی‌تری نسبت به بتن‌های مبتنی بر سیمان نشان داد.

ژانگ و همکاران [۱۰۷] از سنگدانه‌های مرجانی به‌عنوان سنگدانه‌های درشت و ریز برای تهیه بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره-خاکستر بادی با سنگدانه مرجانی استفاده کرده و خواص مکانیکی آن را تحت شرایط آب دریا مطالعه کردند. مطالعات آنها نشان داد که در مقایسه با بتن ژئوپلیمر، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن مبتنی بر سیمان پس از قرارگیری در معرض حملات محیطی آب دریا به‌طور قابل توجهی کاهش یافت، همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- تغییرات مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برای بتن ژئوپلیمر و بتن مبتنی بر سیمان تحت محیط‌های مختلف خوردگی آب دریا. [109]

پس از ۱۲ ماه حمله در محیط‌های سیکل خشک‌شدن و مرطوب‌شدن آب دریا با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن مبتنی بر سیمان به ترتیب ۱۴.۴٪ و ۱۳.۰٪ کاهش یافت، در حالی که این مقادیر برای بتن ژئوپلیمر تنها به ترتیب ۵.۴٪ و ۱۱.۸٪ کاهش یافت. این امر به این دلیل است که Ca(OH)_2 و گچ در دوغاب‌های سیمانی نسبتاً ناپایدار هستند و به راحتی با یون‌های خورنده) مانند Cl^- و SO_4^{2-} در آب دریا واکنش شیمیایی نشان می‌دهند تا اترینگیت یا نمک فریدل را تشکیل دهند (شکل ۱۲). این واکنش‌های شیمیایی باعث تضعیف استحکام و فشردگی ماتریس دوغاب در ساختار می‌شود که در نتیجه باعث می‌شود بتن مبتنی بر سیمان بیشتر از بتن ژئوپلیمر دچار کاهش استحکام شود. [108,109]



شکل ۱۲- الگوهای XRD بتن ژئوپلیمر و بتن مبتنی بر سیمان تحت محیط‌های مختلف خوردگی آب دریا. [109]

علاوه بر این، محیط‌های سیکل خشک‌شدن و مرطوب‌شدن آسیب‌های شدیدی به رفتار مکانیکی بتن وارد کردند، در مقایسه با محیط‌های غوطه‌وری در آب دریا که این امر مربوط به بلورسازی و حل‌شدن مجدد نمک‌های کلرید در آب دریا است [۱۰۹]. با توجه به مقاومت عالی در برابر خوردگی و دمای بتن ژئوپلیمر، کاربرد ژئوپلیمرها در مصالح مهندسی دریایی دارای ارزش و پتانسیل بالایی خواهد بود. ۳. مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلرید

یون‌های کلرید ویژگی‌هایی مانند واکنش‌پذیری بالا، شعاع کوچک و توانایی نفوذ قوی دارند. تأثیر آن‌ها بر دوام بتن عمدتاً به صورت زیر نمایان می‌شود: نفوذ یون‌های کلرید در بتن باعث کاهش مقدار pH محلول منافذ می‌شود که این امر فیلم پاسیوسازی روی سطح میلگردها را تخریب کرده و باعث خوردگی و انبساط میلگردها می‌گردد، که منجر به تشکیل ترک‌های داخلی در سازه‌ها می‌شود [۱۱۳، ۱۱۴]. یون‌های کلرید موجود در بتن بخشی در محلول منافذ به صورت آزاد حل شده و بخشی دیگر به طور شیمیایی یا فیزیکی در محصولات هیدراتاسیون مقید می‌شوند [۱]. مطالعات موجود نشان داده‌اند که نفوذ یون‌های کلرید در بتن یک فرآیند پیچیده است که شامل تعاملات فیزیکی و شیمیایی می‌شود و مکانیسم‌های مهاجرت آن‌ها در بتن عمدتاً شامل انتشار، نفوذ، اثر مویی و مهاجرت الکتروشیمیایی است [۳۵، ۱۱۵]. در میان این مکانیسم‌ها، انتشار معمولاً به عنوان حالت اصلی حمل و نقل یون‌های کلرید در محیط‌های بتن در نظر گرفته می‌شود [۸۲، ۱۱۶]. به دلیل تنوع مواد آلومینو سیلیکات، محصولات هیدراتاسیون و ساختار منافذ بتن ژئوپلیمر متفاوت است، بنابراین مقاومت بتن ژئوپلیمر هر سیستم در برابر نفوذ یون‌های کلرید به طور قابل توجهی متفاوت است. [117]

محصولات اصلی هیدراتاسیون ژئوپلیمرها ژل‌های C-(A)-S-H و N-A-S-H هستند، همراه با حضور مقدار کمی هیدروآلکیت و محصولات فاز مشابه ژئولیت. ژل‌های N-A-S-H معمولاً با منافذ ژل با ساختار شل همراه هستند، در حالی که منافذ در ژل‌های C-A-S-H بیشتر پیوسته و متراکم‌تر هستند که مقاومت بهتری در برابر خوردگی یون‌های کلرید فراهم می‌کند [۱۱۸]. بنابراین، به طور کلی باور بر این است که بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سیستم پرکلسیم مقاومت بهتری در برابر نفوذ یون‌های کلرید نسبت به سیستم کم‌کلسیم دارد. [82]

به طور کلی، بتن ژئوپلیمر در مقایسه با بتن‌های مبتنی بر سیمان با همان درجه مقاومت فشاری، مقاومت بهتری در برابر نفوذ یون‌های کلرید دارد [۱۱۹، ۱۲۰]. این عمدتاً به این دلیل است که ژئوپلیمرها ساختار منافذ و چگالی بهتری نسبت به مواد سیمانی دارند [۱۲۱]. علاوه بر این، فعال‌کننده‌های قلیایی می‌توانند یک محیط قلیایی بالا فراهم کنند که فیلم پاسیوسازی روی سطح میلگردها را تثبیت کرده و خوردگی میلگردها در داخل سازه‌ها را به تأخیر بیندازد. [122]

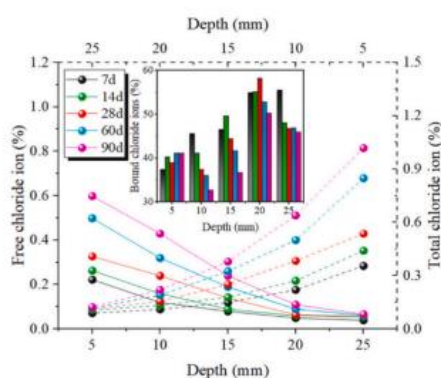
کایالی و همکاران [۱۲۳] جذب فیزیکی را به عنوان دلیل اصلی مقاومت عالی بتن ژئوپلیمر در برابر نفوذ یون‌های کلرید در نظر گرفتند، زیرا هیدروآلکیت در محصولات واکنش ژئوپلیمرها توانایی زیادی در جذب فیزیکی یون‌های کلرید دارد. کوپود-پاتیل و همکاران [۱۲۴] عملکرد نفوذ یون‌های کلرید بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی را با بتن مبتنی بر سیمان مقایسه کرده و نشان دادند که بتن ژئوپلیمر دارای ضریب انتشار پایین‌تر، محتوای یون کلرید و تخلخل کمتری نسبت به بتن مبتنی بر سیمان است. منگات و همکاران [۱۲۵] بیان کردند که یون‌های کلرید در سه فرم در بتن وجود دارند: یون‌های کلرید محلول در آب (یون‌های کلرید مقید فیزیکی)، یون‌های کلرید محلول در اسید (یون‌های کلرید مقید شیمیایی) و یون‌های کلرید آزاد. پس از قرار گرفتن در محلول کلرید (۵٪ NaCl) برای ۱۸۰ روز، غلظت‌های (نسبت به مواد سیمانی از نظر وزن) یون‌های کلرید محلول در آب و محلول در اسید در بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره به ترتیب ۱۰۵٪ و ۰۲۴٪ بود، در حالی که این مقادیر در بتن مبتنی بر سیمان به ترتیب ۲۰۱۳٪ و ۳۰۲٪ بود که نشان می‌دهد نرخ خوردگی یون‌های کلرید در بتن مبتنی بر سیمان بیشتر از بتن ژئوپلیمر است.

راویکومار و همکاران [۱۲۶] ضریب انتشار یون‌های کلرید در بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره و بتن مبتنی بر سیمان را با استفاده از روش مهاجرت غیرپایدار و آزمون نفوذپذیری سریع یون‌های کلرید اندازه‌گیری کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ضریب انتشار یون‌های کلرید در بتن ژئوپلیمر کمتر از بتن مبتنی بر سیمان بود، که نشان‌دهنده این است که بتن ژئوپلیمر مقاومت بهتری در برابر خوردگی یون‌های کلرید دارد و به طور قابل توجهی تخریب فیلم پاسیوسازی روی سطح میلگردها و شروع خوردگی میلگردها را به تأخیر می‌اندازد.

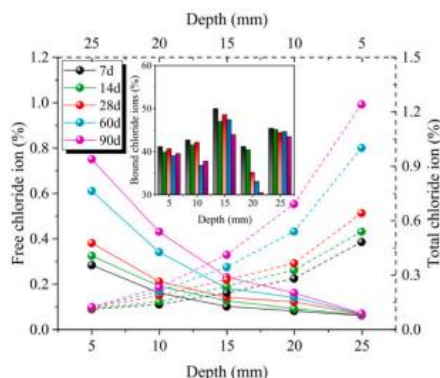
علاوه بر این، برنال و همکاران [۱۲۷] نفوذپذیری یون‌های کلرید را با انجام آزمایش‌های نفوذ سریع کلرید ارزیابی کردند و اظهار داشتند که جریان الکتریکی در بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره کمتر از بتن مبتنی بر سیمان بود، که نشان‌دهنده سرعت کمتر خوردگی میلگردها در بتن ژئوپلیمر نسبت به بتن مبتنی بر سیمان است.

آرورا و همکاران [۱۲۸] از سنگدانه‌های بازیافتی درشت (RCA) به‌عنوان جایگزینی برای سنگدانه‌های سنتی برای تهیه بتن ژئوپلیمر استفاده کردند و تأثیر نسبت جایگزینی RCA بر نفوذ یون کلرید در بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی را بررسی کردند. نتیجه‌گیری شد که مقاومت بتن ژئوپلیمر در برابر نفوذ یون کلرید با افزایش نسبت جایگزینی RCA به تدریج کاهش می‌یابد. در مقایسه با گروه مرجع، شارژهای عبوری در کولمب برای بتن ژئوپلیمر ۹۰ روزه با جایگزینی ۱۰٪ RCA حدود ۱۷٪ افزایش داشت. این کاهش مقاومت در برابر نفوذ کلرید پس از افزایش نسبت جایگزینی RCA به این دلیل بود که رابط‌های بین سنگدانه-دوغاب ضعیف شده و مسیریابی برای نفوذ یون‌های کلرید به بتن ایجاد می‌شود. [57]

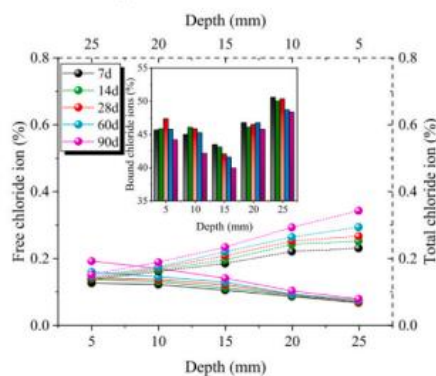
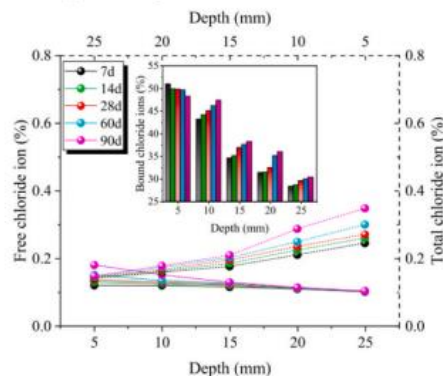
مشاهده مشابهی توسط واکاس و همکاران [۱۲۹] نشان داده شد که بیان کردند بتن ژئوپلیمر با سنگدانه‌های بازیافتی دارای ضریب مهاجرت یون کلرید بالاتری (حدود ۲۷٪ بیشتر) بود که ناشی از ناحیه انتقال رابط ضعیف و تخلخل بالای آن‌ها در مقایسه با بتن ژئوپلیمر با سنگدانه‌های طبیعی بود. فو و همکاران [۱۳۰] تأثیرات جریان محلول ۳.۵٪ NaCl (با سرعت جریان ۰.۲ متر بر ثانیه) و بارگذاری را بر ویژگی‌های انتقال یون کلرید در بتن ژئوپلیمر بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که فرسایش ناشی از محلول‌های خورنده در حال جریان پایداری ژل‌های C-(A)-S-H را کاهش داده و تعداد منافذ مویی و منافذ بزرگ داخل بتن را افزایش داد و در نتیجه سرعت مهاجرت یون‌های کلرید در داخل بتن را افزایش داد. علاوه بر این، اثر بارگذاری باعث شد که بتن در ناحیه فشاری به یکدیگر فشار آورده و تشکیل و گسترش ترک‌ها را به تأخیر بیندازد، و بدین ترتیب نفوذ یون‌های کلرید را مختل کند. بنابراین، غلظت‌های یون‌های کلرید آزاد و کل در داخل بتن ژئوپلیمر تحت محلول‌های خورنده در حال جریان بیشتر از آن‌هایی بود که تحت محلول‌های خورنده ایستا بودند، در حالی که افزایش بارگذاری غلظت یون‌های کلرید داخل بتن را کاهش داد، همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



(a) Static NaCl solution.



(b) Flowing NaCl solution conditions

(c) Coupling effects of flowing NaCl solution and loading
(0.94MPa)(d) Coupling effects of flowing NaCl solution and loading
(1.88MPa)

شکل ۱۳- توزیع یون کلرید در بتن ژئوپلیمر تحت شرایط جریان محلول NaCl و بارگذاری [130]

با این حال، برخی مطالعات نیز نشان داده‌اند که بتن ژئوپلیمر، به‌ویژه بتن ژئوپلیمر کم کلسیم، مقاومت کمتری در برابر نفوذ یون‌های کلرید نسبت به بتن مبتنی بر سیمان دارد [۱۳۱]. چی و همکاران [۱۰۰] اشاره کردند که مقدار شارژ کل عبوری در بتن ژئوپلیمر ۱.۲۲ تا ۱.۹۱ برابر بیشتر از بتن مبتنی بر سیمان بود. آن‌ها معتقد بودند که اندازه مقدار شارژ کل عبوری نه تنها به ساختارهای منافذ بلکه به ترکیب محلول منافذ بستگی دارد. بتن ژئوپلیمر دارای غلظت‌های بالاتری از یون‌ها در محلول منافذ داخلی است که به افزایش جریان الکتریکی کل کمک می‌کند.

ژنگ و همکاران [۱۳۲] اشاره کردند که نفوذ یون‌های کلرید به محصولات هیدراتاسیون مواد چسبنده مربوط است. در بیشتر موارد، بتن ژئوپلیمر با کلسیم بالا (مانند بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره) مقاومت بهتری در برابر خوردگی یون‌های کلرید داشت، در حالی که بتن ژئوپلیمر کم کلسیم (مانند بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی) در مقایسه با بتن مبتنی بر سیمان مقاومت کمتری در برابر خوردگی یون‌های کلرید نشان داد. این ممکن است به دلیل تورم بیشتر و تخلخل ریزتر ژل‌های C-A-S-H در چسبنده‌های ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره نسبت به ژل‌های C-S-H در چسبنده‌های مبتنی بر سیمان باشد. علاوه بر این، افزودن سرباره محصولات هیدراتاسیون اضافی مانند C-(A)-S-H و هیدروتالکیت تولید می‌کند که یون‌های کلرید را جذب کرده و از نفوذ آن‌ها به داخل بتن جلوگیری می‌کند [۱۳۳]، که بدین ترتیب فیلم پاسیو سازی روی سطح میلگردها را محافظت می‌کند. بنابراین، افزایش محتوای سرباره در بتن ژئوپلیمر به‌عنوان روشی مؤثر برای کاهش نفوذپذیری و نرخ انتشار یون‌های کلرید در نظر گرفته می‌شود. [128,134]

اسماعیل و همکاران [۱۳۵] اظهار داشتند که افزودن خاکستر بادی به سیستم‌های ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره موجب تبدیل ژل‌های C-A-S-H متراکم به ژل‌های N-A-S-H متخلخل می‌شود که سرعت حمل و نقل یون‌های کلرید را تسریع می‌کند. به همین دلیل، مقاومت بتن ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره در برابر نفوذ یون‌های کلرید با افزایش محتوای خاکستر بادی کاهش یافت. ژو و همکاران [۱۳۶] بیان کردند

که نرخ مهاجرت یون‌های کلرید در بتن عمدتاً به تخلخل داخلی بستگی دارد و افزودن سرباره به سیستم‌های ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی به بهبود ساختار منافذ کمک می‌کند. لیو و همکاران [۱۱۶] یک مدل عددی چندفازی و چندجزئی یون‌ها برای مطالعه رفتار حمل و نقل یون‌های کلرید در بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی-سرباره با در نظر گرفتن تخلخل، جفت‌شدن الکتروشیمیایی و اتصال یون‌های کلرید بین گونه‌های مختلف ساختند. مطالعات آن‌ها نشان داد که بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی مقاومت ضعیف‌تری در برابر نفوذ یون‌های کلرید نشان داد که ناشی از تشکیل ژل‌های N-A-S-H متخلخل‌تر بود. با افزایش محتوای سرباره، ظرفیت اتصال یون‌های کلرید بتن ژئوپلیمر ضعیف‌تر شد، اما تشکیل ژل‌های C-A-S-H متراکم‌تر باعث کاهش تخلخل کلی شد و در نتیجه مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلرید افزایش یافت. تحت همان سن عمل‌آوری، عمق نفوذ یون‌های کلرید در بتن ژئوپلیمر با ۵۰٪ خاکستر بادی و ۵۰٪ سرباره بسیار کمتر از بتن مبتنی بر سیمان بود، همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

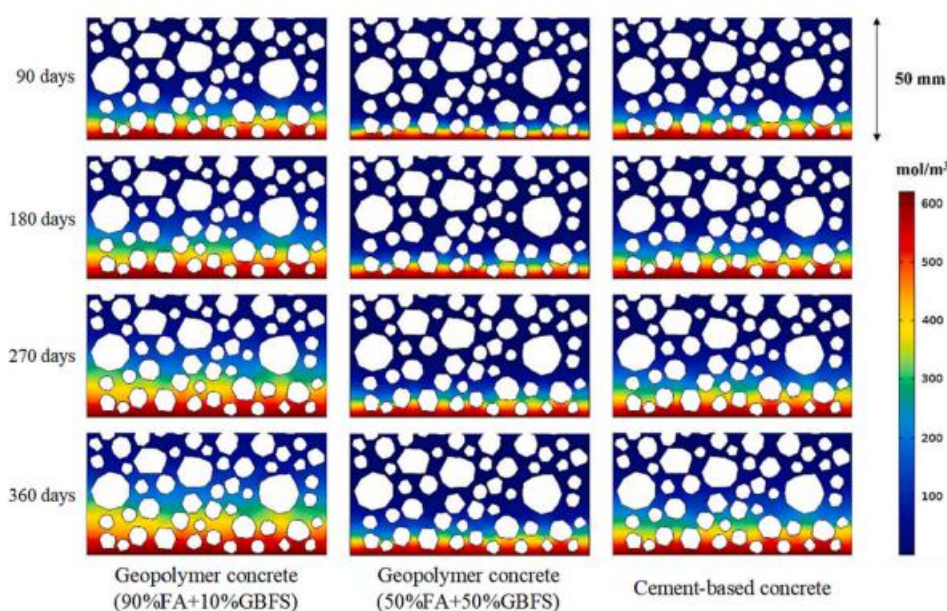


Fig. 14. Distribution of free chloride ion concentration in geopolymer concrete and cement-based concrete [116].

شکل ۱۴- توزیع غلظت یون کلرید آزاد در بتن ژئوپلیمر و بتن مبتنی بر سیمان [116].

برای بهبود بیشتر مقاومت بتن ژئوپلیمر در برابر نفوذ یون‌های کلرید، محققان پیشنهاد کرده‌اند که افزودن مواد معدنی غنی از کلسیم و آلومینیوم به مواد چسبنده ممکن است یک روش مؤثر باشد [۱۳۷]. فن و همکاران [۱۳۷] تأثیرات افزودن Ca(OH)_2 ، نیتريت کلسیم، متاکائولین و سیمان را بر عملکرد اتصال یون‌های کلرید در مخلوط‌های ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره مقایسه کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن مواد معدنی غنی از کلسیم و آلومینیوم می‌تواند ظرفیت اتصال یون‌های کلرید بتن ژئوپلیمر را به‌طور مؤثری تقویت کند، به‌طوری‌که این بهبود تا ۴۴.۴٪ بوده است. ترکیب Ca(OH)_2 و متاکائولین بالاترین ظرفیت اتصال یون‌های کلرید را به‌دست آورد، که پس از آن نیتريت کلسیم و سیمان قرار داشتند. دلیل اصلی این امر این است که افزودن مواد معدنی غنی از کلسیم و آلومینیوم تشکیل فازهای AFm را در سیستم‌های ژئوپلیمر تحریک می‌کند، در حالی که افزودن متاکائولین طول زنجیره‌های میانگین ژل‌های C-(A)-S-H را افزایش داده و بدین ترتیب ظرفیت اتصال یون‌های کلرید بتن ژئوپلیمر را بهبود می‌بخشد. [138]

یانگ و همکاران [۱۳۹] ادعا کردند که افزودن Ca(OH)_2 در سیستم‌های ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره منجر به تشکیل فازهای اضافی AFm، ژل‌های C-A-S-H و هیدروکسید کلسیم در محصولات واکنش می‌شود. این مواد می‌توانند هنگام فرارگیری در محلول کلرید، نمک فریدل اضافی در ماتریس تشکیل دهند. این امر نه تنها ساختار منافذ ماتریس دوغاب را درشت کرده (یعنی تعداد منافذ با اندازه بزرگتر از ۲۰۰ نانومتر را افزایش می‌دهد)، بلکه تخلخل ماتریس دوغاب را نیز کمی کاهش می‌دهد و بدین ترتیب ظرفیت اتصال یون‌های کلرید بتن ژئوپلیمر را تقویت می‌کند.

واکاس و همکاران [۱۲۹] مشاهده کردند که افزودن بنتونیت به بتن ژئوپلیمر نیز برای بهبود مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلرید مفید است. این افزایش مقاومت پس از افزودن بنتونیت به مخلوط‌ها ممکن است به دلیل بهبود آب‌بندی و نفوذناپذیری بتن باشد. علاوه بر این، ژانگ و همکاران [۱۴۰] تأثیر افزودن الیاف فولادی را بر بتن ژئوپلیمر فوق‌العاده با عملکرد بالا مبتنی بر سرباره-متاکائولین ارزیابی کردند و نشان دادند که افزودن الیاف به‌طور مؤثری ویژگی‌های استحکام بتن ژئوپلیمر را تقویت کرده و گسترش ترک‌ها را به تأخیر می‌اندازد، اما عمق نفوذ یون‌های کلرید را افزایش داده و مقاومت آن را در برابر نفوذ یون‌های کلرید کاهش می‌دهد. این ممکن است به خوردگی الیاف فولادی، انباشت جریان و افزایش دمای ناشی از جداسازی الیاف مرتبط باشد.

به‌طور خلاصه، در مقایسه با بتن‌های مبتنی بر سیمان، بتن ژئوپلیمر فیلم پاسیوسازی پایدارتری روی سطح میلگردهای داخلی دارد که از میلگردها در برابر یون‌های کلرید محافظت می‌کند. در همین حال، بتن ژئوپلیمر با کلسیم بالا در مقایسه با بتن ژئوپلیمر کم‌کلسیم مقاومت بیشتری در برابر خوردگی یون‌های کلرید نشان می‌دهد. با این حال، اگرچه بتن ژئوپلیمر مقاومت عالی در برابر خوردگی یون‌های کلرید فراهم می‌کند، بتن‌ها اغلب در پروژه‌های واقعی در معرض چندین یون به‌طور همزمان قرار می‌گیرند. بنابراین، مهم است که تحقیقاتی در مورد دوام بتن ژئوپلیمر در حضور یون‌های کلرید همراه با سایر یون‌ها و اثرات ترکیبی بارها و یون‌های کلرید انجام شود.

۴- نتیجه‌گیری

در خصوص دوام بتن ژئوپلیمر، این مقاله به‌طور سیستماتیک الگوهای تخریب عملکرد و مکانیسم‌های آسیب بتن ژئوپلیمر پس از قرارگیری در معرض فرسایش از پنج جنبه مختلف، یعنی مقاومت در برابر حملات شیمیایی (مانند حملات اسیدی و نمکی)، نفوذ یون‌های کلرید، مقاومت در برابر یخ‌زدگی، مقاومت در برابر کربناتاسیون و واکنش قلیایی-مجموعه را بررسی می‌کند. با جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از تحقیقات در مورد دوام بتن ژئوپلیمر، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

(۱) بتن ژئوپلیمر در مقایسه با بتن‌های مبتنی بر سیمان مقاومت برتری در برابر حملات شیمیایی (یعنی حملات اسیدی و نمکی) نشان می‌دهد. در مقایسه با بتن ژئوپلیمر با کلسیم بالا، بتن ژئوپلیمر با کلسیم کم مقاومت بهتری در برابر حملات اسیدی و نمکی دارد. این مقاومت عالی در برابر حملات شیمیایی در ژئوپلیمرها عمدتاً به ساختار میکروسکوپی متراکم‌تر، ساختار منافذ عالی و محصولات هیدراتاسیون پایدارتر نسبت به مواد OPC نسبت داده می‌شود. در عین حال، این مقاومت در برابر فرسایش شیمیایی بتن ژئوپلیمر همچنین تحت تأثیر نوع اسید و نمک، غلظت‌های اسید و نمک و نوع سنگدانه‌ها قرار دارد. علاوه بر این، افزودن نانو مواد و الیاف می‌تواند به‌طور مؤثری میکروساختارهای بین دوغاب و سنگدانه را بهبود بخشد و تشکیل ترک‌ها را به تأخیر بیندازد، که در نتیجه مقاومت بتن ژئوپلیمر در برابر فرسایش شیمیایی را تقویت می‌کند.

(۲) در مقایسه با بتن‌های مبتنی بر سیمان، بتن ژئوپلیمر ضریب انتشار یون کلرید کمتری داشته و مقاومت بیشتری در برابر خوردگی یون‌های کلرید از خود نشان می‌دهد. به‌طور کلی، بتن ژئوپلیمر با کلسیم بالا مقاومت بهتری در برابر نفوذ یون‌های کلرید نسبت به بتن ژئوپلیمر با کلسیم کم نشان می‌دهد. افزودن مواد معدنی غنی از کلسیم (مانند Ca(OH)_2) و مواد معدنی غنی از آلومینیوم به مواد چسبنده یک روش مؤثر برای تقویت مقاومت بتن ژئوپلیمر در برابر خوردگی یون‌های کلرید است.

(۳) مقاومت بتن ژئوپلیمر در برابر کربناتاسیون عموماً ضعیف‌تر از بتن‌های مبتنی بر سیمان است، اما این مقاومت در برابر کربناتاسیون بتن ژئوپلیمر به‌طور عمده به نوع پیش‌ماده استفاده‌شده بستگی دارد، زیرا تفاوت‌هایی در محصولات هیدراتاسیون و میکروساختارها دارند. به‌طور کلی، بتن ژئوپلیمر با کلسیم بالا کمی مقاومت بهتری در برابر کربناتاسیون نسبت به بتن ژئوپلیمر با کلسیم کم دارد. مقاومت بتن ژئوپلیمر در برابر کربناتاسیون تا حدی می‌تواند با استفاده از عمل‌آوری در دماهای بالا، افزودن افزودنی‌های شیمیایی (مانند کندکننده‌ها) یا

مواد معدنی تقویت شود، اما مقاومت کربناتاسیون آن‌ها به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع و غلظت فعال‌کننده‌ها، مدول سیلیکات سدیم و شرایط کربناتاسیون قرار دارد.

مراجع

- [1] Wang, A.G., Zheng, Y., Zhang, Z.H., Liu, K.W., Li, Y., Shi, L., et al. (2020). The durability of alkali-activated materials in comparison with ordinary Portland cements and concretes: A review. *Eng*, 6, 695–706. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.08.019>.
- [2] Singh, N.B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: an overview. *Constr Build Mater*, 237, 117455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>.
- [3] Zhang, B., Zhu, H., Cheng, Y.Z., Huseien, G.F., & Shah, K.W. (2022). Shrinkage mechanisms and shrinkage-mitigating strategies of alkali-activated slag composites: A critical review. *Constr Build Mater*, 318, 125993. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125993>.
- [4] Shehata, N., Sayed, E.T., & Abdelkareem, M.A. (2021). Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. *Sci Total Environ*, 762, 143166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143166>.
- [5] Mastali, M., Kinnunen, P., Dalvand, A., Mohammadi Firouz, R., & Illikainen, M. (2018). Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review. *Constr Build Mater*, 190, 533–550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.125>.
- [6] Tian, L., He, D., Zhao, J., & Wang, H. (2021). Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review. *Rev Adv Mater Sci*, 60, 1–14. <https://doi.org/10.1515/rams-2021-0002>.
- [7] Amran, Y.H.M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete: A review. *J Clean Prod*, 251, 119679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>.
- [8] Lu, C., Zhang, Z., Shi, C., Li, N., Jiao, D., & Yuan, Q. (2021). Rheology of alkali-activated materials: A review. *Cem Concr Compos*, 121, 104061. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104061>.
- [9] Elahi, M.M.A., Hossain, M.M., Karim, M.R., Zain, M.F.M., & Shearer, C. (2020). A review on alkali-activated binders: materials composition and fresh properties of concrete. *Constr Build Mater*, 260, 119788. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119788>.
- [10] Zhang, B., Cheng, Y., Zhu, H., & Huseien, G.F. (2023). Bond performance between BFRP bars and alkali-activated seawater coral aggregate concrete. *Eng Struct*, 279, 115596. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115596>.
- [11] Wang, Y., Fan, P., Chen, R., Hu, J., Ma, Y., Zhang, Z., et al. (2024). The influence of chlorides on corrosion behavior of carbon steel in slag-based geopolymer pore solution. *J Build Eng*, 85, 108702. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108702>.
- [12] Qin, L., Yan, J., Zhou, M., Liu, H., Wang, A., Zhang, W., et al. (2023). Mechanical properties and durability of fiber reinforced geopolymer composites: A review on recent progress. *Eng Rep*, e12708. <https://doi.org/10.1002/eng2.12708>.
- [13] Tu, W., & Zhang, M. (2023). Behaviour of alkali-activated concrete at elevated temperatures: A critical review. *Cem Concr Compos*, 138, 104961. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104961>.
- [14] Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z., & Ou, Z. (2017). Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. *Constr Build Mater*, 152, 598–613. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.027>.
- [15] Zhang, P., Han, X., Hu, S., Wang, J., Wang, T. (2022). High-temperature behavior of polyvinyl alcohol fiber-reinforced metakaolin/fly ash-based geopolymer mortar. *Compos Part B Eng*, 244, 110171. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110171>.
- [16] Zhang, P., Han, X., Guo, J., Hu, S. (2023). High-temperature behavior of geopolymer mortar containing nano-silica. *Constr Build Mater*, 364, 129983. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129983>.
- [17] Yang, Z., Lu, F., Zhan, X., Zhu, H., Zhang, B., Chen, Z., et al. (2024). Mechanical properties and mesoscopic damage characteristics of basalt fibre-reinforced seawater sea-sand slag-based geopolymer concrete. *J Build Eng*, 84, 108688. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108688>.
- [18] Xu, L.Y., Huang, B.T., Lao, J.C., Yao, J., Li, V.C., Dai, J.-G. (2023). Tensile over-saturated cracking of ultra-high-strength engineered cementitious composites (UHS-ECC) with artificial geopolymer aggregates. *Cem Concr Compos*, 136, 104896. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104896>.
- [19] Mendes, B.C., Pedroti, L.G., Vieira, C.M.F., Marvila, M., Azevedo, A.R.G., Franco de Carvalho, J.M. (2021). Application of eco-friendly alternative activators in alkali-activated materials: A review. *J Build Eng*, 35, 102010. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102010>.
- [20] Zhang, P., Wang, K.X., Li, Q.F., Wang, J., Ling, Y.F. (2020). Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders - A review. *J Clean Prod*, 258, 120896. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120896>.
- [21] Kravchenko, E., Lazorenko, G., Jiang, X., Leng, Z. (2024). Alkali-activated materials made of construction and demolition waste as precursors: A review. *Sustain Mater Technol*, 39, e00829. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00829>.

- [22] Ojha, A., Aggarwal, P. (2021). Fly ash based geopolymer concrete: A comprehensive review. *Silicon*, 14, 2453–2472. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01044-0>.
- [23] Zhang, B., Zhu, H., Dong, Z.Q., Wang, Q. (2022). Enhancement of bond performance of FRP bars with seawater coral aggregate concrete by utilizing ecoefficient slag-based alkali-activated materials. *J Compos Constr*, 26(1), 04021059. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001174](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001174).
- [24] Zhang, P., Gao, Z., Wang, J., Guo, J., Hu, S.W., Ling, Y.F. (2020). Properties of fresh and hardened fly ash/slag based geopolymer concrete: A review. *J Clean Prod*, 270, 122389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122389>.
- [25] Almutairi, A.L., Tayeh, B.A., Adesina, A., Isleem, H.F., Zeyad, A.M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Stud Constr Mater*, 15, e00733. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733>.
- [26] Provis, J.L. (2018). Alkali-activated materials. *Cem Concr Res*, 114, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>.
- [27] Lu, B.C., Guo, L.P., Ding, C., Wu, J.D., Cao, Y.Z., Chen, B. (2023). A review on performance and microstructure of high ductility geopolymer composite. *Mater Report*, 37(10), 21060226. <https://doi.org/10.11896/cldb.21060226>.
- [28] Huang, D., Yuan, Q., Chen, P., Tian, X., Peng, H. (2022). Effect of activator properties on drying shrinkage of alkali-activated fly ash and slag. *J Build Eng*, 62, 105341. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105341>.
- [29] Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M. (2018). One-part alkali-activated materials: A review. *Cem Concr Res*, 103, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>.
- [30] Ma, C.K., Awang, A.Z., Omar, W. (2018). Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Constr Build Mater*, 186, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.111>.
- [31] Zhang, B., Zhu, H., Xiong, T., Peng, H. (2024). Flexural behavior of FRP bars reinforced seawater coral aggregate concrete beams incorporating alkali-activated materials. *Mater Struct*, 57, 26. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02298-x>.
- [32] Zhang, B., Zhu, H., Feng, P., Zhang, P. (2022). A review on shrinkage-reducing methods and mechanisms of alkali-activated/geopolymer systems: effects of chemical additives. *J Build Eng*, 49, 104056. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104056>.
- [33] Duan, W., Zhuge, Y., Chow, C.W.K., Keegan, A., Liu, Y., Siddique, R. (2022). Mechanical performance and phase analysis of an eco-friendly alkali-activated binder made with sludge waste and blast-furnace slag. *J Clean Prod*, 374, 134024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134024>.
- [34] Yang, G., Zhao, J., Wang, Y. (2022). Durability properties of sustainable alkali-activated cementitious materials as marine engineering material: A review. *Mater Today Sustainabil*, 17, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100099>.
- [35] Wong, L.S. (2022). Durability performance of geopolymer concrete: A review. *Polymers (Basel)*, 14, 868. <https://doi.org/10.3390/polym14050868>.
- [36] Li, W., Shumuye, E.D., Shiyong, T., Wang, Z., Zerfu, K. (2022). Eco-friendly fibre reinforced geopolymer concrete: A critical review on the microstructure and long-term durability properties. *Case Stud Construct Mater*, 16, e00894. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00894>.
- [37] Zhang, P., Sun, Y., Wu, J., Hong, J., Gao, Z. (2023). Mechanical properties and microstructure of nano-modified geopolymer concrete containing hybrid fibers after exposure to elevated temperature. *Constr Build Mater*, 409, 134044. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134044>.
- [38] Fu, Q., Xu, W., Zhao, X., Bu, M., Yuan, Q., Niu, D. (2021). The microstructure and durability of fly ash-based geopolymer concrete: A review. *Ceram Int*, 47, 29550–29566. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.190>.
- [39] Zhang, P., Sun, X., Wang, F., Wang, J. (2023). Mechanical properties and durability of geopolymer recycled aggregate concrete: A review. *Polymers (Basel)*, 15, 615. <https://doi.org/10.3390/polym15030615>.
- [40] Chen, K., Wu, D., Xia, L., Cai, Q., Zhang, Z. (2021). Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments – A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement. *Constr Build Mater*, 279, 122496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122496>.
- [41] Logesh Kumar, M., Revathi, V. (2023). Durability studies in alkaline activated systems (metakaolin-bottom ash): A prospective study. *Boletín de la Soc. Española de Cerámica y Vidrio*, 62, 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.09.004>.
- [42] Karaaslan, C., Yener, E., Bagatur, T., Polat, R. (2022). Improving the durability of pumice-fly ash based geopolymer concrete with calcium aluminate cement. *J Build Eng*, 59, 105110. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105110>.
- [43] Pradhan, P., Dwibedy, S., Pradhan, M., Panda, S., Panigrahi, S.K. (2022). Durability characteristics of geopolymer concrete - Progress and perspectives. *J Build Eng*, 59, 105100. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105100>.
- [44] Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Drechsler, M. (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Constr Build Mater*, 136, 374–385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056>.
- [45] Valencia-Saavedra, W.G., Mejía de Gutiérrez, R., Puertas, F. (2020). Performance of FA-based geopolymer concretes exposed to acetic and sulfuric acids. *Constr Build Mater*, 257, 119503. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119503>.
- [46] Amran, M., Debbarma, S., Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Constr Build Mater*, 270, 121857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>.

- [47] Gu, L., Visintin, P., Bennett, T. (2018). Evaluation of accelerated degradation test methods for cementitious composites subject to sulfuric acid attack; application to conventional and alkali-activated concretes. *Cem Concr Compos*, 87, 187–204. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.015>.
- [48] Xie, Y., Lin, X., Ji, T., Liang, Y., Pan, W. (2019). Comparison of corrosion resistance mechanism between ordinary Portland concrete and alkali-activated concrete subjected to biogenic sulfuric acid attack. *Constr Build Mater*, 228, 117071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117071>.
- [49] Mehta, A., Siddique, R. (2017). Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete. *Constr Build Mater*, 146, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.077>.
- [50] Sarıdemir, M., Çelikten, S. (2022). Effect of high temperature, acid and sulfate on properties of alkali-activated lightweight aggregate concretes. *Constr Build Mater*, 317, 125886. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125886>.
- [51] Aiken, T.A., Kwasny, J., Sha, W., Soutsos, M.N. (2018). Effect of slag content and activator dosage on the resistance of fly ash geopolymer binders to sulfuric acid attack. *Cem Concr Res*, 111, 23–40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.011>.
- [52] Koenig, A., Herrmann, A., Overmann, S., Dehn, F. (2017). Resistance of alkali-activated binders to organic acid attack: assessment of evaluation criteria and damage mechanisms. *Constr Build Mater*, 151, 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.117>.
- [53] Gopalakrishnan, R., Chinnaraju, K. (2016). Durability of alumina silicate concrete based on slag/fly-ash blends against acid and chloride environments. *Mater Technol*, 50, 929–937. <https://doi.org/10.17222/mit.2015.230>.
- [54] Elyamany, H.E., Elmoaty, A.E.M.A., Diab, A.R.A. (2020). Sulphuric acid resistance of slag geopolymer concrete modified with fly ash and silica fume. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, 45, 2297–2315. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00515-5>.
- [55] Okoye, F.N., Prakash, S., Singh, N.B. (2017). Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. *J Clean Prod*, 149, 1062–1067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.176>.
- [56] Okoye, F.N., Durgaprasad, J., Singh, N.B. (2016). Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete. *Ceram Int*, 42, 3000–3006. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.084>.
- [57] Nuaklong, P., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *J Clean Prod*, 112, 2300–2307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.109>.
- [58] Ma, Q., Yang, W., Duan, Z., Liu, H., Hua, M., Deng, Q. (2022). Influence of alkali-activators on acid rain resistance of geopolymer-recycled pervious concrete with optimal pore size. *Materials*, 15, 8368. <https://doi.org/10.3390/ma15238368>.
- [59] Teymouri, M., Behfarnia, K., Shabani, A. (2021). Mix design effects on the durability of alkali-activated slag concrete in a hydrochloric acid environment. *Sustainability*, 13, 8096. <https://doi.org/10.3390/su13148096>.
- [60] Teymouri, M., Behfarnia, K., Shabani, A., Saadatian, A. (2022). The effect of mixture proportion on the performance of alkali-activated slag concrete subjected to sulfuric acid attack. *Materials*, 15, 196754. <https://doi.org/10.3390/ma15196754>.
- [61] Saloni, P., Pham, T.M., Lim, Y.Y., Malekzadeh, M. (2021). Effect of pre-treatment methods of crumb rubber on strength, permeability, and acid attack resistance of rubberised geopolymer concrete. *J Build Eng*, 41, 102448. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102448>.
- [62] Pradhan, S.S., Mishra, U., Biswal, S.K., Jangra, P., Pham, T.M., Arora, S., et al. (2022). Effects of crumb rubber inclusion on strength, permeability, and acid attack resistance of alkali-activated concrete incorporating different industrial wastes. *Struct Concr*, 23, 3616–3630. <https://doi.org/10.1002/suco.202100640>.
- [63] Luhar, S., Chaudhary, S., Luhar, I. (2019). Development of rubberized geopolymer concrete: strength and durability studies. *Constr Build Mater*, 204, 740–753. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.185>.
- [64] Pather, B., Ekolu, S.O., Quainoo, H. (2021). Effects of aggregate types on acid corrosion attack upon fly-ash geopolymer and Portland cement concretes – comparative study. *Constr Build Mater*, 313, 125468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125468>.
- [65] Metekong, S., Kaze, C.R., Deutou, J.G., Venyite, P., Nana, A., Kamseu, E., et al. (2021). Evaluation of performances of volcanic-ash-laterite based blended geopolymer concretes: mechanical properties and durability. *J Build Eng*, 34, 101935. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101935>.
- [66] Kaze, C.R., Tchakoute, H.K., Mbakop, T.T., Mache, J.R., Kamseu, E., Melo, U.C., et al. (2018). Synthesis and properties of inorganic polymers (geopolymers) derived from Cameroon-meta-halloysite. *Ceram Int*, 44, 18499–18508. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.070>.
- [67] Ibrahim, M., Salami, B.A., Algaifi, H.A., Kalimur Rahman, M., Nasir, M., Ewebajo, A.O. (2021). Assessment of acid resistance of natural pozzolan-based alkali-activated concrete: experimental and optimization modelling. *Constr Build Mater*, 304, 124657. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124657>.
- [68] Liu, X.Y., Liu, H., Wang, X.J., Zhu, P.H., Chen, C.H., Zhou, X.L. (2023). Sulfuric acid corrosion resistance of graphene oxide modified geopolymer recycled concrete. *Mater Report*, 1–14. <https://doi.org/10.11896/cldb.22010212>.
- [69] Karthik, A., Sudalaimani, K., Vijayakumar, C.T. (2017). Durability study on coal fly ash-blast furnace slag geopolymer concretes with bio-additives. *Ceram Int*, 43, 11935–11943. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.042>.

- [70] Moghaddam, C.M., Madandoust, R., Jamshidi, M., Nikbin, I.M. (2021). Mechanical properties of fly ash-based geopolymers with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions. *Constr Build Mater*, 281, 122571. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122571>.
- [71] Ariffin, M.A.M., Bhutta, M.A.R., Hussin, M.W., Mohd Tahir, M., Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Constr Build Mater*, 43, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.018>.
- [72] Nguyen, K.T., Lee, Y.H., Lee, J., Ahn, N. (2018). Acid resistance and curing properties for green fly ash-geopolymer concrete. *J Asian Architect Build Eng*, 12, 317–322. <https://doi.org/10.3130/jaabe.12.317>.
- [73] Xie, Y., Lin, X., Pan, W., Ji, T., Liang, Y., Zhang, H. (2018). Study on corrosion mechanism of alkali-activated concrete with biogenic sulfuric acid. *Constr Build Mater*, 188, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.105>.
- [74] Gu, L., Bennett, T., Visintin, P. (2019). Sulphuric acid exposure of conventional concrete and alkali-activated concrete: assessment of test methodologies. *Constr Build Mater*, 197, 681–692. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.166>.
- [75] Kumar, R., Verma, M., Dev, N. (2021). Investigation on the effect of seawater condition, sulphate attack, acid attack, freeze-thaw condition, and wetting–drying on the geopolymer concrete. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, 46, 2823–2853. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00767-9>.
- [76] Albegmri, H.M., Al-Qazzaz, Z.K.A., Rejeb, S.K. (2022). Strength performance of alkali activated structural lightweight geopolymer concrete exposed to acid. *Ceram Int*, 48, 6867–6873. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.240>.
- [77] Ganesan, N., Abraham, R., Deepa, R.S. (2015). Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete. *Constr Build Mater*, 93, 471–476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.014>.
- [78] Sikder, A., Mishra, J., Krishna, R.S., Ighalo, J.O. (2022). Evaluation of the mechanical and durability properties of geopolymer concrete prepared with C-glass fibers. *Arab J Sci Eng*, 206, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07558-y>.
- [79] Nagajothi, S., Elavenil, S., Angalaeswari, S., Natrayan, L., Mammo, W.D., Putra, J.R. (2022). Durability studies on fly ash based geopolymer concrete incorporated with slag and alkali solutions. *Adv Civil Eng*, 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/7196446>.
- [80] Lavanya, G., Jegan, J. (2015). Durability study on high calcium fly ash based geopolymer concrete. *Adv Mater Sci Eng*, 2015, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2015/731056>.
- [81] Zhang, B., Zhu, H. (2023). Durability of seawater coral aggregate concrete under seawater immersion and dry-wet cycles. *J Build Eng*, 66, 105894. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105894>.
- [82] Gao, K.K., Cui, W.F., Zhang, P., Zhao, T.J. (2020). Research progress on reinforcement corrosion in alkali activated concrete under chloride attack. *Bull Chin Ceram Soc*, 39, 3070–3077. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20200602.001>.
- [83] Zhang, B., Zhu, H., Chen, J., Bond durability between BFRP bars and seawater coral aggregate concrete under seawater corrosion environments. *Constr Build Mater*, 379, 131274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131274>.
- [84] Zhang, B., Wang, W., Yang, Z., Zhu, H. (2023). Understanding the bond performance between BFRP bars and alkali-activated seawater coral aggregate concrete under marine environments. *Eng Struct*, 288, 116228. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116228>.
- [85] Ye, H., Chen, Z., Huang, L. (2019). Mechanism of sulfate attack on alkali-activated slag: the role of activator composition. *Cem Concr Res*, 125, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105868>.
- [86] Snelson, D.G., Kinuthia, J.M. (2010). Resistance of mortar containing unprocessed pulverised fuel ash (PFA) to sulphate attack. *Cem Concr Compos*, 32, 523–531. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.001>.
- [87] Zhang, B., Zhu, H., Dong, Z., Yang, Z. (2023). Mechanical properties and durability of FRP-reinforced coral aggregate concrete structures: A critical review. *Mater Today Commun*, 35, 105656. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105656>.
- [88] Ozcan, A., Karakoç, M.B. (2019). Evaluation of sulfate and salt resistance of ferrochrome slag and blast furnace slag-based geopolymer concretes. *Struct Concr*, 20, 1607–1621. <https://doi.org/10.1002/suco.201900061>.
- [89] Valencia Saavedra, W.G., Angulo, D.E., Mejía de Gutiérrez, R. (2016). Fly ash slag geopolymer concrete: resistance to sodium and magnesium sulfate attack. *J Mater Civ Eng*, 28, 04016148. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001618](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001618).
- [90] Aydın, S., Baradan, B. (2021). Sulfate resistance of alkali-activated slag and Portland cement based reactive powder concrete. *J Build Eng*, 43, 103205. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103205>.
- [91] Kanaan, D., Soliman, A.M., Safhi, A.E.M. (2023). External sulfate attack of ambient-cured one-part alkali-activated self-consolidating concrete. *Sustainability*, 15, 4127. <https://doi.org/10.3390/su15054127>.
- [92] Elyamany, H.E., Elmoaty, A.E.M.A., Elshaboury, A.M. (2018). Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. *Constr Build Mater*, 184, 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.212>.
- [93] Chindaprasirt, P., Sriopas, B., Phosri, P., Yoddumrong, P., Anantakarn, K., Kroehong, W. (2022). Hybrid high calcium fly ash alkali-activated repair material for concrete exposed to sulfate environment. *J Build Eng*, 45, 103590. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103590>.
- [94] Xie, J., Zhao, J., Wang, J., Huang, P., Fang, C. (2019). Sulfate resistance of recycled aggregate concrete with GGBS and fly ash-based geopolymer. *Materials*, 12, 1247. <https://doi.org/10.3390/ma12081247>.

- [95] Karakoç, M.B., Türkmen, I., Maraş, M.M., Kantarci, F., Demirboga, R. (2016). Sulfate resistance of ferrochrome slag based geopolymer concrete. *Ceram Int*, 42, 1254–1260. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.058>.
- [96] Fan, J.Y., Jiang, Y., Wang, L.M., Ding, F.Y., Guo, L., Duan, P. (2020). Sulfate attack resistance of sisal-PVA hybrid fiber reinforced geopolymer. *Bull Chin Ceram Soc*, 39, 1430–1437. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2020.05.010>.
- [97] Parthiban, K., Saravana Raja Mohan, K. (2017). Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Constr Build Mater*, 133, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.050>.
- [98] Ugurlu, I., Karakoç, M.B., Ozcan, A. (2021). Effect of binder content and recycled concrete aggregate on freeze-thaw and sulfate resistance of GGBFS based geopolymer concretes. *Constr Build Mater*, 301, 124246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124246>.
- [99] Jena, S., Panigrahi, R. (2021). Evaluation of durability and microstructural properties of geopolymer concrete with ferrochrome slag as coarse aggregate. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, 46, 1201–1210. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00691-y>.
- [100] Chi, M. (2012). Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete. *Constr Build Mater*, 35, 240–245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.005>.
- [101] Jin, Q., Zhang, P., Wu, J., Sha, D. (2022). Mechanical properties of nano-SiO₂ reinforced geopolymer concrete under the coupling effect of a wet-thermal and chloride salt environment. *Polymers (Basel)*, 14, 2298. <https://doi.org/10.3390/polym14112298>.
- [102] Kantarci, F., Influence of fiber characteristics on sulfate resistance of ambient-cured geopolymer concrete. *Struct Concr*, 23, 775–790. <https://doi.org/10.1002/suco.202100540>.
- [103] Zhang, P., Sun, Y., Guo, Z., Hong, J., Wang, F. (2023). Strengthening mechanism of polyvinyl alcohol fibers on mechanical properties of geopolymer concrete subjected to a wet-hot-salt environment. *Polym Test*, 127, 108199. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108199>.
- [104] Zhang, P., Wang, C., Guo, Z., Hong, J., Wang, F. (2023). Effect of polyvinyl alcohol fibers on mechanical properties of nano-SiO₂-reinforced geopolymer composites under a complex environment. *Nanotechnol Rev*, 12, 20230142. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0142>.
- [105] Tang, Z., Deng, N., Evangelista, L. (2022). Effect of salt solution on the mechanical behaviors of geopolymer concrete under dry-wet cycles. *Adv Mater Sci Eng*, 2022, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2022/9120821>.
- [106] Reddy, D.V., Edouard, J.-B., Sobhan, K. (2013). Durability of fly ash-based geopolymer structural concrete in the marine environment. *J Mater Civ Eng*, 25, 781–787. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000632](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000632).
- [107] Zhang, B., Zhu, H. (2023). Compressive stress-strain behavior of slag-based alkali-activated seawater coral aggregate concrete after exposure to seawater environments. *Constr Build Mater*, 367, 130294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130294>.
- [108] Zhang, B., Peng, H., Xiong, T., Zhu, H. (2024). Deterioration of bond performance between BFRP bars and coral aggregate concrete incorporating slag-based geopolymers under seawater corrosion environments. *Constr Build Mater*, 411, 134518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134518>.
- [109] Zhang, B., Peng, H., Xiong, T., Zhu, H. (2023). Towards enhancing the durability of seawater coral aggregate concrete under drying-wetting cycles with slag-based geopolymers. *J Sustain Cem-Based Mater*, 13, 389–401. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.1894265>.
- [110] Bhutta, M.A.R., Hussin, W.M., Azreen, M., Tahir, M.M., Aziah, N. (2014). Sulphuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *J Mater Civ Eng*, 26, 04014080. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001030).
- [111] Tang, L., Zhang, H.E., Huang, Q., Wang, Q.Y., Shi, X.S. (2015). Research on resistance to sulfates of fly ash based geopolymeric recycled concrete. *J Sichuan Univ (Eng Sci Edit)*, 47, 164–170. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.2015.s1.028>.
- [112] Ren, J., Wang, W.W., Zhang, S.Y., Wang, Y.P., Wang, T. (2022). Experimental study on durability of alkali-activated mineral powder and fly ash concrete. *China Concrete and Cement Product*, 95–98. <https://doi.org/10.19761/j.1000-4637.2022.09.095.04>.
- [113] Zhao, R.D., Yang, S.Y., Jia, W.T., Zeng, X.S., Jin, H.S., Li, F.H. (2021). Review of recent progress in durability of fly ash based geopolymer concrete. *J Southwest Jiaotong Univ*, 56, 1065–1074. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.20190993>.
- [114] Tale Masoule, M.S., Bahrami, N., Karimzadeh, M., Mohasanati, B., Shoaie, P., Ameri, F., et al. (2022). Lightweight geopolymer concrete: A critical review on the feasibility, mixture design, durability properties, and microstructure. *Ceram Int*, 48, 10347–10371. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.298>.
- [115] Nuaklong, P., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2018). Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens. *Constr Build Mater*, 161, 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.152>.

- [116] Liu, Q.-f., Cai, Y., Peng, H., Meng, Z., Mundra, S., Castel, A. (2023). A numerical study on chloride ion transport in alkali-activated fly ash/slag concretes. *Cem Concr Res*, 166, 107094. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107094>.
- [117] Zhang, J., Ma, Y., Hu, J., Wang, H., Zhang, Z. (2022). Review on chloride transport in alkali-activated materials: role of precursors, activators, and admixtures. *Constr Build Mater*, 328, 127081. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127081>.
- [118] Osio-Norgaard, J., Gevaudan, J.P., Srubar, W.V. (2018). A review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete. *Constr Build Mater*, 186, 191–206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.119>.
- [119] Zhang, X., Long, K., Liu, W., Li, L., Long, W.J. (2020). Carbonation and chloride ions' penetration of alkali-activated materials: A review. *Molecules*, 25, 5074. <https://doi.org/10.3390/molecules25215074>.
- [120] Huyen, V.T., Dang, L.C., Kang, G., Sirivivatnanon, V. (2022). Chloride induced corrosion of steel reinforcement in alkali activated slag concretes: A critical review. *Case Stud Construct Mater*, 16, e01112. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01112>.
- [121] Venkatesan, R.P., Pazhani, K.C. (2015). Strength and durability properties of geopolymer concrete made with ground granulated blast furnace slag and black Rice husk ash. *KSCE J Civ Eng*, 20, 2384–2391. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0564-0>.
- [122] Ma, Q., Nanukuttan, S.V., Basheer, P.A.M., Bai, Y., Yang, C. (2015). Chloride transport and the resulting corrosion of steel bars in alkali activated slag concretes. *Mater Struct*, 49, 3663–3677. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0747-7>.
- [123] Kayali, O., Khan, M.S.H., Sharfuddin, A.M. (2012). The role of hydrotalcite in chloride binding and corrosion protection in concretes with ground granulated blast furnace slag. *Cem Concr Compos*, 34, 936–945. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.009>.
- [124] Kupwade-Patil, K., Allouche, E.N. (2013). Examination of chloride-induced corrosion in reinforced Geopolymer concretes. *J Mater Civ Eng*, 25, 1465–1476. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000672](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000672).
- [125] Mangat, P.S., Ojedokun, O.O. (2019). Bound chloride ingress in alkali activated concrete. *Constr Build Mater*, 212, 375–387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.302>.
- [126] Ravikumar, D., Neithalath, N. (2013). Electrically induced chloride ion transport in alkali activated slag concretes and the influence of microstructure. *Cem Concr Res*, 47, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.01.007>.
- [127] Bernal, S.A., Mejía de Gutiérrez, R., Pedraza, A.L., Provis, J.L., Rodriguez, E.D., Delvasto, S. (2011). Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cem Concr Res*, 41, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.017>.
- [128] Arora, S., Jangra, P., Pham, T.M., Lim, Y.Y. (2022). Enhancing the durability properties of sustainable geopolymer concrete using recycled coarse aggregate and ultrafine slag at ambient curing. *Sustainability*, 14, 10948. <https://doi.org/10.3390/su141710948>.
- [129] Waqas, R.M., Butt, F., Danish, A., Alqurashi, M., Mosaberpanah, M.A., Masood, B. (2021). Influence of bentonite on mechanical and durability properties of high-calcium fly ash geopolymer concrete with natural and recycled aggregates. *Materials*, 14, 7790. <https://doi.org/10.3390/ma14247790>.
- [130] Fu, Q., Zhang, Z., Niu, D. (2023). Understanding the acceleration impact of load and flowing water on the chloride ion transport properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Cem Concr Compos*, 141, 105146. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105146>.
- [131] Noushini, A., Castel, A., Aldred, J., Rawal, A. (2020). Chloride diffusion resistance and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymer concrete. *Cem Concr Compos*, 105, 103290. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.006>.
- [132] Zheng, J.Z. (2019). Study on Mix Proportions and Chloride Resistance of Alkali-Activated Concrete. Dissertation, Guangzhou University, China. (In Chinese).
- [133] Wan, X.M., Liu, G.Q., Zhao, T.J. (2019). Investigation on adsorption behavior of chloride by calcium silicate hydrate and calcium aluminum silicate hydrate. *J Build Mater*, 22, 31–37. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2019.01.005>.
- [134] Babaei, M., Castel, A. (2018). Chloride diffusivity, chloride threshold, and corrosion initiation in reinforced alkali-activated mortars: role of calcium, alkali, and silicate content. *Cem Concr Res*, 111, 56–71. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.009>.
- [135] Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., San Nicolas, R., Brice, D.G., Kilcullen, A.R. (2013). Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Constr Build Mater*, 48, 1187–1201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.106>.
- [136] Zhu, H., Zhang, Z., Zhu, Y., Tian, L. (2014). Durability of alkali-activated fly ash concrete: chloride penetration in pastes and mortars. *Constr Build Mater*, 65, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.110>.
- [137] Fan, X., Wang, Y., Yu, Q., Gao, X., Ye, J., Zhang, Y. (2023). Improving the chloride binding capacity of alkali activated slag by calcium and aluminum enriched minerals. *J Build Eng*, 70, 106384. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106384>.
- [138] Qi, Z., Zuo, Y., Kurumisawa, K., Lang, A. (2023). Effect of curing temperatures and additional activators on chloride ingress and its induced mineralogical alteration of ground granulated blast furnace slag activated by Ca(OH)₂. *Cem Concr Compos*, 141, 105153. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105153>.

[139] Yang, T., Fan, X., Gao, X., Gu, Q., Xu, S., Shui, Z. (2022). Modification on the chloride binding capacity of alkali activated slag by applying calcium and aluminium containing phases. *Constr Build Mater*, 358, 129427. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129427>.

[140] Zhang, Y., Chen, J., Xia, J. (2022). Compressive strength and chloride resistance of slag/metakaolin-based ultra-high-performance geopolymer concrete. *Materials*, 16, 181. <https://doi.org/10.3390/ma16010181>.