

A Review of the Use of Steel Slag in Concrete

Gholamreza Havaei

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

ABSTRACT

Industrial modernization leads to an increased demand for steel worldwide. The production of each ton of raw steel generates significant amounts of steel slag (SS), approximately 130–200 kilograms. The accumulation of steel slag creates economic and environmental problems, especially in developing countries with low utilization rates. Therefore, increasing the utilization ratio of steel slag has become an urgent priority. To address this issue, this paper examines the effect of adding steel slag as a supplementary cementitious material (SCM) and aggregate in concrete on various properties of concrete, with the aim of increasing the reuse of steel slag. The results of the analyses indicate that the addition of steel slag powder (SSP) may have negative effects on the initial setting time, volume stability, compressive strength, and durability of concrete. However, these issues can be mitigated through aging processes and high-reactivity supplementary cementitious materials. In the case of steel slag aggregate (SSA), this material can effectively increase the compressive strength of concrete. However, it may have negative effects on workability, volume stability, and residual strength after exposure to high temperatures. Additionally, the mechanism of SSA's impact on the durability performance of concrete is complex, making it difficult to obtain reliable results.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 February 2021

Revise Date: 30 May 2021

Accept Date: 15 June 2021

Keywords:

Steel Slag

Concrete

Blended Concrete

Pozzolans

Concrete Durability

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525735.3743>

*Corresponding author: Gholamreza Havaei

Email address: Havaei@aut.ac.ir

مروری بر کاربرد سرباره فولاد در بتن

غلامرضا هوایی

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

چکیده:

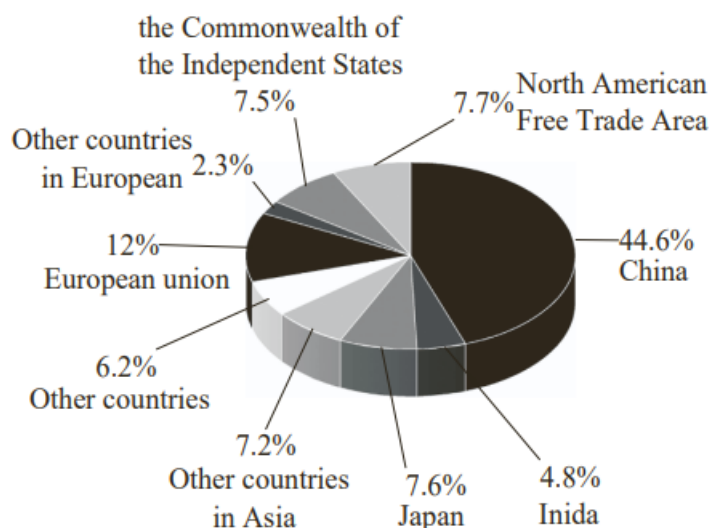
مدرنیزاسیون صنعتی منجر به افزایش تقاضا برای فولاد در سراسر جهان می‌شود. تولید هر تن فولاد خام مقادیر قابل توجهی سرباره فولاد (SS) تولید می‌کند که در حدود ۱۳۰-۲۰۰ کیلوگرم است. انباشت سرباره فولاد مشکلات اقتصادی و زیست‌محیطی ایجاد می‌کند، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که نرخ بهره‌برداری پایینی دارند. بنابراین، افزایش نسبت بهره‌برداری از سرباره فولاد به یک اولویت فوری تبدیل شده است. برای حل این مشکل، این مقاله تأثیر افزودن سرباره فولاد به عنوان یک ماده سیمانی تکمیلی (SCM) و دانه‌ها در بتن را بر خواص مختلف بتن بررسی می‌کند تا از بازگشت سرباره فولاد استفاده بیشتری شود. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که افزودن پودر سرباره فولاد (SSP) ممکن است اثرات منفی بر زمان گیرش اولیه، پایداری حجمی، مقاومت فشاری و دوام بتن داشته باشد. با این حال، این مشکلات می‌توانند از طریق فرآیندهای پیری و مواد سیمانی تکمیلی با واکنش بالا کاهش یابند. در مورد دانه‌های سرباره فولاد (SSA)، این ماده می‌تواند به‌طور مؤثری مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد. با این حال، ممکن است تأثیر منفی بر کارایی، پایداری حجمی و مقاومت باقی‌مانده بتن پس از مواجهه با دماهای بالا داشته باشد. علاوه بر این، مکانیزم تأثیر SSA بر عملکرد دوام بتن پیچیده است که باعث می‌شود نتایج قابل اعتماد به‌دست آمده دشوار باشد.

کلمات کلیدی: سرباره، بتن، بتن آمیخته، پوزولان، دوام بتن

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525735.3743					
	10.22065/jsce.2025.525735.3743	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	۱۴۰۰/۰۳/۲۵	۱۴۰۰/۰۳/۲۵	۱۴۰۰/۰۳/۰۹	۱۳۹۹/۱۲/۱۰
غلامرضا هوایی havaei@aut.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، به دنبال فرآیند مدرنیزاسیون، تقاضا و عرضه فولاد در سطح جهانی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. طبق آمارهای انجمن فولاد جهانی (WSA)، تولید جهانی فولاد خام در سال ۲۰۲۱ به رقم شگفت‌انگیز ۱.۸۷۸ میلیارد تن رسید. از میان کشورهای بزرگ تولیدکننده، چین ۴۴.۶٪ از تولید سالانه را به خود اختصاص داده است، در حالی که اتحادیه اروپا ۱۲.۰٪ از تولید جهانی را تشکیل می‌دهد. شکل ۱ نمایش بصری مقادیر تولید فولاد برای کشورهای بزرگ و مناطق مختلف را ارائه می‌دهد.



شکل ۱- تولید فولاد خام در سراسر جهان

تولید فولاد منجر به تولید سرباره فولاد، یک محصول جانبی می‌شود که میزان آن بین ۱۳۰ کیلوگرم تا ۲۰۰ کیلوگرم به ازای هر تن فولاد خام تولید شده است [۱،۲]. نسبت و نوع این سرباره بستگی به فرآیند تولید به کار رفته دارد. انباشت سرباره فولاد می‌تواند منجر به مشکلات زیست‌محیطی مختلفی مانند نشت فلزات سنگین، آلودگی هوا و اشغال اراضی شود [۳-۶]. کشورهای توسعه‌یافته مانند ژاپن فناوری‌های پیشرفته‌ای برای استفاده مجدد از سرباره فولاد دارند و به نسبت بهره‌برداری نزدیک به ۱۰۰٪ دست یافته‌اند. با این حال، بسیاری از کشورهای در حال توسعه هنوز نسبت‌های بهره‌برداری کمتری دارند که بین ۲۰٪ تا ۳۰٪ متغیر است [۷،۸]. بنابراین، توجه بیشتری به جستجو برای استفاده‌های جدید از سرباره فولاد و انجام تحلیل‌های امکان‌سنجی و سودمندی این مواد معطوف شده است که به یکی از محورهای تحقیقاتی مهم تبدیل شده است.

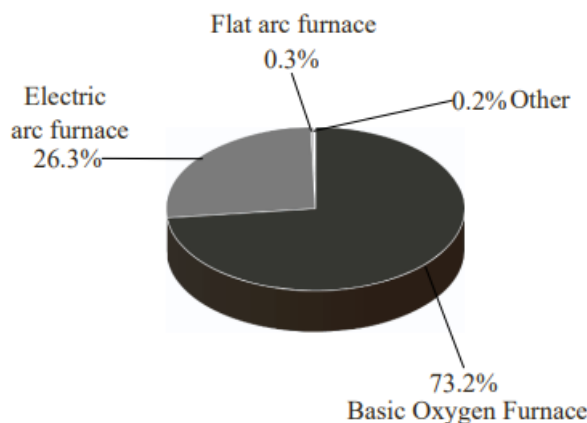
در حال حاضر، سرباره فولاد در زمینه‌های مختلفی به کار می‌رود که شامل مصرف داخلی در صنعت فولاد، حمل‌ونقل جاده‌ای و مصالح ساختمانی می‌شود. در حوزه مصالح ساختمانی، از سرباره فولاد عمدتاً به عنوان ماده سیمانی تکمیلی (SCM) یا دانه در بتن استفاده می‌شود.

هدف این مقاله ارائه یک مروری جامع بر جدیدترین پیشرفت‌ها در تحقیقات بتن سرباره فولاد و شناسایی زمینه‌های احتمالی برای تحقیقات آینده است. با تجمیع دانش موجود، این مقاله قصد دارد به توسعه بتن سرباره فولاد کمک کند و مسیر را برای تلاش‌های تحقیقاتی بیشتر هموار سازد.

۲- سرباره فولاد

دو روش اصلی مورد استفاده در تولید فولاد عبارتند از فرآیند کوره اکسیژن پایه (BOF) و فرآیند کوره قوس الکتریکی [9] (EAF) بیشتر سرباره فولاد تولید شده مربوط به سرباره فولاد BOF است. طبق آمارهای WSA، تولید جهانی فولاد خام با استفاده از فرآیند کوره کنورتور

در سال ۲۰۲۱ معادل ۷۳.۲٪ بود، در حالی که فرآیند کوره قوس الکتریکی معادل ۲۶.۳٪ بود. فرآیند کوره باز نیز تنها ۰.۳٪ از تولید کلی را تشکیل داد. شکل ۲ نمایش بصری توزیع تولید فولاد خام در فرآیندهای مختلف تولید فولاد در سراسر جهان در سال ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد.



شکل ۲- فرآیند اصلی تولید فولاد در سراسر جهان

۲-۱ سرباره کوره اکسیژن پایه (BOFS)

عموماً، BOFS به‌عنوان یک ماده متخلخل شناخته می‌شود و ویژگی‌های فیزیکی اساسی آن در جدول ۱ ارائه شده است. چگالی ظاهری BOFS معمولاً در بازه $3.3-3.4 \text{ g/cm}^3$ قرار دارد که به‌طور قابل توجهی بالاتر از چگالی دانه‌های طبیعی مانند سنگ آهک و گرانیت است که چگالی آن‌ها بین 2.65 تا 2.7 g/cm^3 است. این تفاوت به حضور اکسیدهای فلزی با وزن مولکولی بالا مانند اکسید آهن، Al_2O_3 و دی‌اکسید تیتانیوم و غیره در BOFS نسبت داده می‌شود. نسبت جذب آب سرباره فولاد حدود ۲٪ است که نسبت به دانه‌های طبیعی مانند گرانیت و مرمر که معمولاً نسبت جذب آب آن‌ها حدود ۰.۵٪ است، بالاتر است. این تفاوت به ساختار میکروسکوپی متخلخل سرباره فولاد نسبت داده می‌شود. مقدار خرد شدن (12-15%) BOFS برابر یا کمی کمتر از دانه‌های طبیعی مانند گرانیت (۱۷٪) و سنگ آهک (۱۳.۹٪) است. این نشان می‌دهد که مقاومت BOFS در برابر خرد شدن تحت بارهای فشاری مشابه یا کمی بهتر از دانه‌های طبیعی است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی BOFS

Property Source	apparent density (g/cm^3)	Water absorption (%/wt.)	L-A abrasion loss (%/wt.)	Impact value (%/wt.)	Crushing value (%/wt.)
Motz et al.,2001 [14]	3.3	1	-	22	15
Liu et al.2020 [15]	3.39	1.83	13.2	-	13.9
Xue et al.,2006 [16]	-	1.18	13.1	-	12
Shen et al.,2018 [17]	3.273	2.3	13.2	-	-
Haritonovs et al.,2013 [18]	3.25	2.4	19	-	-
Gao et al.,2017 [19]	3.308	1.9	-	-	-
Brand A. t al.,2015 [20]	3.52	2.31	-	-	-
Pang et al.,2015 [21]	3.42	3.31	-	-	-

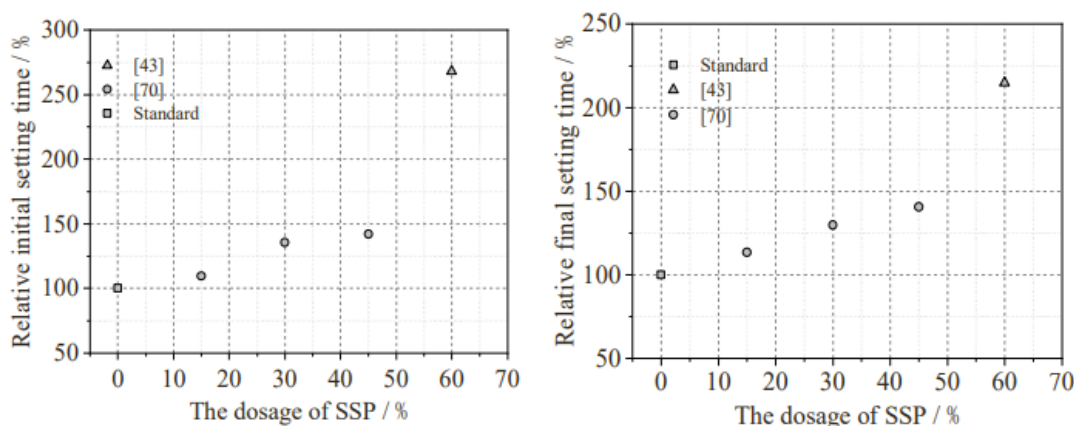
ترکیب شیمیایی سرباره BOFS می‌تواند بسته به منبع و فرآیند تولید خاص آن تفاوت‌های قابل توجهی داشته باشد. در حالی که نقاط داده افراطی کنار گذاشته شده‌اند، اجزای اصلی سرباره BOFS شامل CaO (29.7 - 52.6%)، SiO_2 (10.74 - 19.9%)، اکسیدهای آهن (16.2 - 32%)، Al_2O_3 (0.98 - 9.84%)، MgO (0.82 - 11.2%)، همچنین CaO آزاد (۱.۷ - ۱۲.۲٪) و مقادیر کمی از MgO آزاد و سایر اجزای باقی مانده هستند.

حضور اکسیدهایی مانند CaO ، SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 در سرباره BOFS باعث تشکیل ترکیباتی مانند C_2S ، C_3S ، C_2F و C_4AF می‌شود که قابلیت هیدراته شدن دارند. این ترکیبات نقش مهمی در خواص سیمانی پودر سرباره فولاد ریزدانه (SSP) دارند و آن را به یک ماده سیمانی تکمیلی (SCM) مناسب برای بتن تبدیل می‌کنند [۱۰]. آن‌ها همچنین به بهبود مقاومت فشاری بتن هنگام استفاده به عنوان دانه در بتن کمک می‌کنند. محتوای بالاتر C_2S و C_3S در ترکیب سرباره BOFS منجر به بهبود خواص سیمانی و افزایش عملکرد SSP به عنوان SCM می‌شود.

حضور CaO آزاد (f-CaO) عمدتاً از آهک آزاد باقی مانده در مواد اولیه و آهک رسوب شده در سرباره ناشی می‌شود. مقدار مناسب f-CaO باعث افزایش کلیاییت و فعالیت هیدرولیکی SSP می‌شود [۱۰]. با این حال، مقدار زیاد f-CaO می‌تواند مشکلاتی مانند تولید حرارت بیش از حد و انبساط نامتوازن ایجاد کند که منجر به مشکلات قابل توجهی در پایداری حجمی هنگام استفاده در تولید بتن یا ملات می‌شود [۱۱، ۱۲]. علاوه بر این، اکسیدهای آهن پتانسیل انبساط هنگام تماس با آب را دارند [۱۳] که همچنین تأثیر قابل توجهی بر پایداری حجمی بتن دارد. مشکل پایداری حجمی در بتن سرباره فولاد در بخش‌های بعدی با جزئیات بیشتر مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲-۲ سرباره کوره قوس الکتریکی (EAFs)

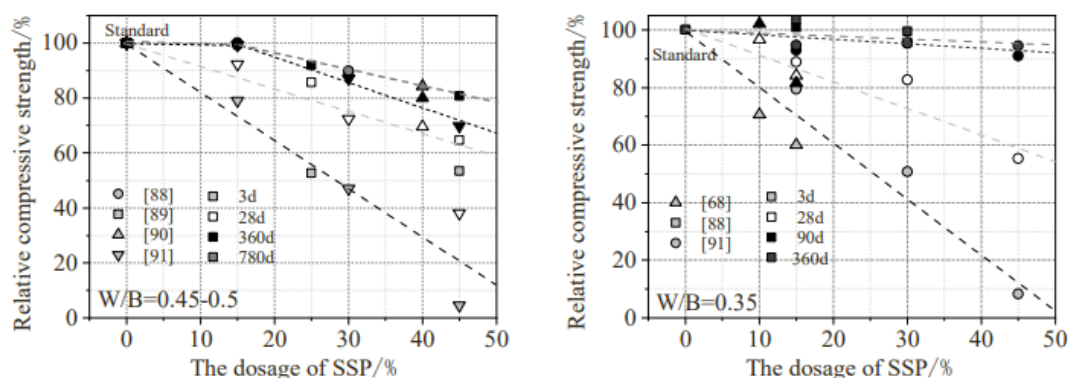
در شرایط عادی، مشابه BOFS، EAFs نیز ویژگی‌های متخلخل دارد و تغییرات قابل توجهی در خواص سرباره از منابع و دسته‌های تولید مختلف مشاهده می‌شود. چگالی ظاهری EAFs معمولاً بین ۳.۴ تا ۳.۵ g/cm^3 قرار دارد که کمی بیشتر از BOFS است. نسبت جذب آب EAFs بین ۰.۵ تا ۱.۵٪ متمرکز است که کمی کمتر از BOFS است. تفاوت در نسبت جذب آب ممکن است به چگالی ظاهری کمی بالاتر EAFs نسبت داده شود که منجر به نتایج اندازه‌گیری پایین‌تر می‌شود؛ به‌طور جایگزین، ممکن است به تخلخل کمی کمتر ماده نسبت به BOFS مربوط باشد.



شکل ۳- زمان گیرش نسبی بتن‌های SSP

مقایسه با BOFS، EAFs تغییرات بیشتری در ترکیب شیمیایی نشان می‌دهد، همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است. با کنار گذاشتن برخی داده‌های افراطی، اجزای اصلی شامل CaO (29.11-53.98%)، SiO_2 (14.1-18.42%)، اکسیدهای آهن (18-29.92%)، Al_2O_3 (1.05-7.4%)، MgO (2.91-10.48%)، همچنین f-CaO (0.45-5.45%) و f-MgO (1%) به عنوان اجزای آزاد هستند. به‌طور کلی، EAFs محتوای CaO کمتری دارد اما مقادیر بیشتری از SiO_2 و اکسیدهای آهن نسبت به BOFS نشان می‌دهد. این تفاوت‌ها در ترکیب

شیمیایی را می توان به استفاده از فرآیندهای مختلف تولید فولاد نسبت داد. با این حال، مهم است که توجه داشته باشیم که تفاوتها بین دو نوع سرباره نسبتاً کم است.



شکل ۴- مقاومت فشاری نسبی (RCS) بتن‌های SSP

۳- بتن پودر سرباره فولاد (SSPC)

تفاوت‌های ترکیب شیمیایی بین پودر سرباره فولاد (SSP) و سیمان پرتلند معمولی عمدتاً در محتوای بالاتر اکسید آهن و مقدار کمی از f-MgO و f-CaO در SSP است. بر اساس تجزیه و تحلیل اشعه ایکس با استفاده از پراکندگی انرژی (EDX)، SSP شامل ترکیباتی مانند C_2S ، C_3S و C_4AF است که نشان‌دهنده داشتن ویژگی‌های سیمانی خاصی مشابه سیمان پرتلند معمولی است [۶۱، ۴۴، ۱۳، ۱۱، ۱۰-۱۶]. به همین دلیل، SSP می‌تواند به‌عنوان یک ماده سیمانی تکمیلی (SCM) در تولید ملات و بتن استفاده شود.

مشاهده شده است که ترکیب SSP به‌عنوان SCM، تحت شرایط خاص، می‌تواند میکروساختار، مقاومت مکانیکی و خواص دوام ملات یا بتن را بهبود بخشد [۶۵، ۳۴-۶۷]. با این حال، استفاده از SSP به‌عنوان SCM اغلب باعث تأخیر در زمان گیرش، کاهش مقاومت اولیه و مشکلاتی در پایداری حجمی می‌شود. بنابراین، برای غلبه بر این چالش‌های ذاتی و دستیابی به نتایج کاربردی بهبود یافته، معمولاً توصیه می‌شود که SSP با سایر SCM‌های فعال ترکیب شود.

۳-۱ کارایی

در حالی که برخی تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن SSP به بتن ممکن است منجر به کاهش افست (slump) شود [۶۹، ۶۸]، تحقیقات دیگر نشان داده‌اند که استفاده از SSP به‌عنوان یک SCM در سیمان می‌تواند نیاز به آب را کاهش داده و کارایی را بهبود بخشد [۷۰، ۴۳]. نتایج متناقض تحقیقات را می‌توان به دو جنبه از تأثیرات ناشی از افزودن SSP نسبت داد. از یک سو، SSP با پر کردن فضاهای خالی بین ذرات سیمان با ذرات ریزتر، باعث افزایش چگالی بسته‌بندی مرطوب [71] (WPD) ملات یا بتن می‌شود و برخی از رطوبت اصلی برای پر کردن فضاها در نظر گرفته‌شده را به سمت روان‌سازی ذرات هدایت می‌کند، که باعث بهبود جریان‌پذیری مخلوط می‌شود. از سوی دیگر، به دلیل ریز بودن ذرات SSP، مساحت ویژه آن‌ها از ذرات سیمان بیشتر است که منجر به کاهش ضخامت فیلم آبی که هر ذره را پوشش می‌دهد می‌شود، که این پارامتر حیاتی برای کنترل جریان‌پذیری ملات و بتن است. [74-72]

با توجه به تغییرات در دقت، خواص SSP و نسبت‌های اختلاط بتن، تأثیرات مذکور وزن‌های مختلفی دارند که منجر به نتایج متناقض تحقیقاتی می‌شود. با این حال، باید توجه داشت که بهبود کارایی زمانی که محتوای SSP از ۴۰٪ بیشتر می‌شود، کاهش می‌یابد [۷۵]. علاوه بر این، افزودن SSP زمان گیرش اولیه ملات را به‌طور قابل توجهی طولانی‌تر می‌کند، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است. [43, 69, 70, 72]

این پدیده عمدتاً به محتوای پایین تر C_3S که نرخ هیدراتاسیون سریع تری دارد و اندازه بلور و ساختار C_2S در SSP نسبت داده می شود C_3S : فاز معدنی است که به طور اصلی به هیدراتاسیون اولیه سیمان کمک می کند، و محتوای C_3S در SSP به طور قابل توجهی کمتر از سیمان معمولی است. در نتیجه، این امر منجر به سرعت پایین تر هیدراتاسیون اولیه در SSP نسبت به بتن با سیمان معمولی می شود که منجر به افزایش زمان های گیرش اولیه و نهایی می شود. علاوه بر این، به دلیل اندازه بلور بزرگتر ($> 70 \mu m$) و ساختار خوشه ای C_2S که بلورهای کاملاً گردی نمی سازد، واکنش های هیدراتاسیون اولیه کندتر C_2S حتی کندتر می شود [۶۳،۷۰]. برخی تحقیقات حتی نشان می دهند که SSP سهم کمی در فرایند هیدراتاسیون دارد [۴۳].

سرعت واکنش سیمان ترکیبی با SSP تحت تأثیر مجموعه ای از مکانیسم های مختلف است که شامل سینتیک هسته گذاری، واکنش های شیمیایی، پخش و واکنش های مرز فازی می باشد. این مکانیسم ها نقش های مختلفی در مقادیر مختلف ($\leq 35\%$) SSP، ۵۰٪ (و در مراحل مختلف هیدراتاسیون مانند دوره های تسریع و کاهش سرعت ایفا می کنند. [76]

بنابراین، افزودن موادی با فعالیت هیدرولیکی قوی مانند فعال کننده $CaCl_2$ [42]، SCM هایمانند خاکستر بادی (FA)، دود سیلیسی (SF) یا سرباره کوره بلند گرانول زده (GGBF) و غیره در سیستم کامپوزیتی سیمان-SSP به عنوان بخشی از یک افزودنی ترکیبی، می تواند زمان گیرش اولیه را به طور مؤثری کوتاه کند. با این حال، باید توجه داشت که اگرچه افزودن این مواد می تواند مشکل زمان گیرش طولانی را به طور قابل توجهی بهبود بخشد، هنوز کافی نیست تا به سطح سیمان معمولی برسد [۶۳،۶۷]. علاوه بر این، نرخ هیدراتاسیون اولیه می تواند با تنظیم مناسب دقت [73-75] SSP، قلیایی بودن [72،73،76] ($pH \geq 13.6$)، درمان با آب سرد [۳۳] و افزایش دمای محیط هیدراتاسیون [۷۲،۷۳،۷۷] افزایش یابد. با این حال، مهم است که دمای محیط هیدراتاسیون نباید از ۶۰ درجه سانتی گراد بیشتر شود تا از کربناتاسیون محصولات هیدراتاسیون جلوگیری شده و از انبساط خمیر و کاهش مقاومت فشاری جلوگیری شود. [81]

کارایی اصلی ترین عاملی است که هنگام ارزیابی مناسب بودن یک ماده برای افزودن به بتن باید در نظر گرفته شود. عملکرد SSP از نظر کارایی امیدوارکننده است. با این حال، باید توجه داشت که استفاده نادرست از SSP ممکن است اثرات منفی بر روی برنامه زمان بندی کلی پروژه به دلیل اثر کندکننده آن بر بتن داشته باشد.

۲-۳ پایداری حجمی

هیدراتاسیون و بلوریزاسیون سریع بتن یا ملات منجر به تشکیل یک سیستم "سخت و شکننده" می شود، که حتی انبساطات جزئی می توانند باعث گسترش سریع و وسیع ترک های میکروسکوپی شوند، که در نهایت ممکن است به شکست کامل منتهی شود. بنابراین، باید توجه دقیقی به پایداری حجمی SSP هنگام استفاده به عنوان یک ماده مکمل سیمانی در بتن معطوف گردد. در واقع، علاوه بر ویژگی های نسبتاً ضعیف سیمانی آن، یکی دیگر از دلایل عمده محدودیت کاربرد SSP به عنوان یک ماده مکمل سیمانی، مشکلات پایداری حجمی آن است. تحقیقات متعدد نشان داده اند که افزودن SSP می تواند منجر به انبساط حجمی خاصی شود که اغلب با تجزیه و کاهش مقاومت همراه است. [13،78]

همانطور که قبلاً ذکر شد، حضور چشمگیر f-CaO و f-MgO در SSP تأثیر زیادی بر پایداری حجمی آن دارد، که این موضوع تأثیر زیادی بر پایداری حجمی بتن یا ملات می گذارد [۱۱،۳۹،۴۰،۴۳،۷۹]. در جامعه علمی به طور گسترده ای شناخته شده است که اثرات منفی f-CaO بر پایداری حجمی SS بیشتر از f-MgO است، زیرا f-MgO محتوا و میزان واکنش کمتری دارد و سرعت واکنش آن کندتر است [۴۵]. علاوه بر این، شایان ذکر است که افزودن SSP در کنترل انبساط قلیایی-سنگدانه ای در ملات مؤثر به نظر می رسد و استفاده ترکیبی آن با GGBF اثرات چشم تری را ایجاد می کند. [84]

تحقیقات نشان داده اند که محتوی f-CaO در SS می تواند از طریق فرآیندهای مناسب به طور مؤثر کنترل شود. اگرچه روش های مختلفی مانند آب زدایی [۳۳،۸۱]، اکسیداسیون [۱۱]، کربناتاسیون [۵۲]، فرآیند اختناق حرارتی [۳۴،۸۱] و فرآیندهای سایش و شلاته سازی [۱۲] در شرایط آزمایشگاهی نشان داده اند که به طور قابل توجهی محتوی f-CaO در SS کاهش می یابد، اما مؤثرترین و اقتصادی ترین روش

همچنان فرآیند پیری طبیعی است [۵۴,۷۹,۸۲]. با این حال، اثر کاهش پیری طبیعی بر محتوی f-CaO در SS ممکن است در بعضی موارد حداقل باشد. [۴۲] این اختلاف می تواند به این دلیل باشد که فرآیندهای پیری شامل فرسایش طبیعی از طریق مواجهه با نور خورشید، باران و سایر عوامل محیطی است و شرایط خاص پیری SS استفاده شده در هر آزمایش ممکن است متفاوت باشد (باز یا پوشش شده، بارانی یا خشک و غیره). در نتیجه، نتایج نهایی ممکن است تغییرات قابل توجهی را نشان دهند.

بنابراین، هنگام استفاده از SSP به عنوان یک ماده مکمل سیمانی، ضروری است که مسائل مربوط به پایداری حجمی آن، به ویژه محتوی f-CaO و f-MgO، به دقت در نظر گرفته شود. تجربیات عملی نشان داده اند که فرآیندهای پیری می توانند به طور مؤثر و اقتصادی محتوی f-CaO در SS را کاهش دهند. بنابراین، افزودن SS به بتن هم از نظر عملی و هم اقتصادی مقرون به صرفه و ممکن است.

۳-۳ مقاومت

افزودن اندک SSP (0-15%) تأثیرات کمی بر مقاومت فشاری کلینکر [۶۰,۷۰,۸۳]، ملات و بتن [۶۸,۸۴] دارد، و این تأثیرات از نظر مقاومت بلندمدت قابل چشم پوشی هستند. با این حال، افزودن بیش از حد SSP (> 20%) تأثیرات قابل توجهی بر کاهش مقاومت فشاری سیمان [۴۳]، ملات [۶۳,۷۱] و بتن [۸۷-۱۳,۸۰,۸۴] دارد. علاوه بر این، برای نسبت های تعویض یکسان SSP، با کاهش نسبت آب به چسب (w/b)، اثرات منفی SSP بر مقاومت فشاری بتن کاهش می یابد [۶۸,۸۷]. بنابراین، در حالی که باید به نسبت های کاهش مقاومت مشابه پایبند بود، مقدار مجاز افزودن SSP می تواند با کاهش نسبت w/b افزایش یابد.

شکل ۴ تأثیر نسبت های مختلف تعویض SSP بر مقاومت فشاری بتن در دو نسبت w/b را نشان می دهد و دوره های مختلف عمل آوری را پوشش می دهد. این شکل به وضوح نشان می دهد که افزودن SSP منجر به کاهش قابل توجهی در مقاومت اولیه بتن می شود. با این حال، تأثیرات آن بر مقاومت های بعدی بتن با نسبت w/b پایین تر کمتر مشهود است.

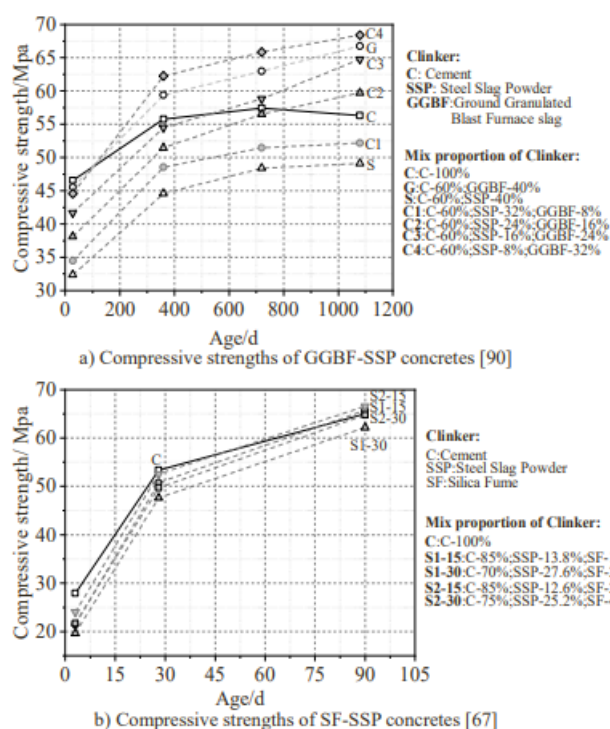
بر اساس تحقیقات موجود، می توان به نتایج زیر رسید:

۱. مقایسه با شرایطی که نسبت w/b بالاتری دارند، افزودن SSP به بتن با نسبت w/b پایین تر به عنوان یک انتخاب مطلوب به نظر می رسد.
۲. در نسبت w/b پایین، حتی با دوز کم SSP (< 20%)، مقاومت فشاری اولیه بتن به طور قابل توجهی و منفی تحت تأثیر قرار می گیرد. با این حال، با گذشت زمان، دامنه این تأثیر به طور قابل توجهی کاهش می یابد. به عبارت دیگر، مقاومت بلندمدت بتن با دوز پایین SSP و نسبت w/b پایین به طور مشابه با بتن معمولی می شود [۸۹].
۳. در مورد بتن با مقاومت فوق العاده بالا (UHPC)، افزودن SSP به عنوان یک SCM می تواند عملکرد ناحیه انتقال مرز (ITZ) را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. این افزودن مزایای خاصی در جایگزینی پودر کوارتز برای ریختن UHPC دارد [62].
۴. SSP می تواند برای کنترل فرآیند هیدراسیون مورد استفاده قرار گیرد تا بتن با مقاومت و عملکرد بالا به دست آید [۸۴]. دلیل این پدیده ممکن است به این دلیل باشد که تحت شرایط نسبت w/b بالاتر، محصولات هیدراسیون SSP نسبت به معادل وزنی سیمان، مقادیر به مراتب کمتری از $Ca(OH)_2$ دارند. این به طور عمده به دلیل محتوای کمتر C_2S ، C_3S و سایر فازهای معدنی کلینکر در SSP نسبت به سیمان است [۸۸]. به همین دلیل، مشارکت SSP در فرآیند هیدراسیون به طور قابل توجهی کمتر از کلینکر سیمان است. علاوه بر این، افزودن SSP به طور قابل توجهی باعث افزایش تخلخل بتن در مراحل اولیه هیدراسیون می شود و در نتیجه چگالی بسته بندی را کاهش می دهد، که تأثیر قابل توجهی بر مقاومت بتن در مراحل اولیه هیدراسیون دارد [۷۴]. با این حال، چگالی بتن SSP به طور تدریجی با گذشت زمان افزایش می یابد، که تأثیرات منفی SSP بر مقاومت را کاهش می دهد. تأثیر مقدار کمی از f-CaO موجود در SSP نباید نادیده گرفته شود، زیرا این ماده به طور قابل توجهی بر مقاومت فشاری بتن تأثیر می گذارد، عمدتاً از طریق تجزیه ذرات سرباره و کاهش مقاومت [13,67].

از سوی دیگر، تحت شرایط نسبت w/b پایین تر، ظرفیت محدودتر هیدراسیون SSP اجازه می‌دهد تا آن به‌طور کافی با مقدار کمتری آب نسبت به شرایط با نسبت w/b بالاتر واکنش دهد. این امر از کاهش بیش از حد مقاومت در مراحل اولیه و میانه هیدراسیون جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، به دلیل نسبت w/b پایین تر ذاتاً، افزایش تخلخل بتن در مقایسه با شرایط نسبت w/b بالاتر چندان برجسته نمی‌شود. این ویژگی به سیستم بتن SSP، این امکان را می‌دهد که حتی پس از هیدراسیون کامل، چگالی‌ای نزدیک به بتن با عملکرد بالا (HPC) حفظ کند.

در کاربردهای عملی، معمولاً لازم است که SSP با برخی از SCM‌های با فعالیت هیدرولیکی بالا [۶۹،۷۹،۹۲]، مانند SF و GGBF، یا فعال‌کننده‌ها [۶۹] مانند باقیمانده دسمولفوریزاسیون، سولفات سدیم و گچ دسمولفوریزاسیون ترکیب شود. با استفاده از نسبت مخلوط مناسب، اثرات منفی افزودن SSP به مقاومت بتن [۶۷،۸۴،۹۰،۹۳]، ملات [۶۳] و کلینکر [۴۳،۶۳] می‌تواند به‌طور قابل توجهی کاهش یابد. بتن فرموله‌شده با نسبت مخلوط مناسب می‌تواند به مقاومت فشاری مشابه سیمان پرتلند معمولی دست یابد. علاوه بر این، همبستگی مثبت قابل توجهی بین نسبت SCM‌های با فعالیت بالا (مانند GGBF) و مقاومت فشاری بتن وجود دارد [۸۴،۹۰،۹۳]. با این حال، لازم به ذکر است که در شرایط دوز پایین تر SSP در طراحی مخلوط، هم مقاومت فشاری بتن [۹۰،۹۳] و هم ملات کلینکر [۷۹] می‌تواند از گروه کنترل بدون SSP اما با مقدار برابر SCM‌های با فعالیت بالا پیشی بگیرد. به عبارت دیگر، مقدار کمی SSP می‌تواند مقاومت فشاری بتن سیمان پرتلند معمولی را زمانی که با SCM‌های با فعالیت بالا مخلوط می‌شود، افزایش دهد. این پدیده را می‌توان به این دلیل نسبت داد که هیدراسیون SSP به‌تنهایی عمدتاً منجر به تشکیل ذرات C-S-H صفحه‌ای (۲۰ - ۵۰ نانومتر) می‌شود، در حالی که مخلوط SSP و SCM‌های با فعالیت بالا مانند GGBF به‌طور قابل توجهی هیدراسیون زود هنگام را تسریع کرده و مقدار قابل توجهی ذرات C-S-H الیافی (۱۵ - ۲۰ نانومتر) تولید می‌کند. واضح است که دومی اثر مثبت تری بر توسعه مقاومت بتن دارد.

افزودن SSP به بتن به‌طور قابل توجهی مقاومت اولیه آن را کاهش می‌دهد، در حالی که تأثیر آن بر مقاومت بلندمدت نسبتاً کمتر برجسته است [۸۸،۹۰،۹۱]. جالب است که وقتی با مقدار کمی SCM با فعالیت بالا استفاده شود، مقاومت بلندمدت بتن حتی می‌تواند از بتن سیمان پرتلند معمولی پیشی بگیرد [۶۷،۹۰]، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است. این پدیده را می‌توان به ترکیب SSP نسبت داد که نسبت کمتری از C3S با نرخ هیدراسیون سریع‌تر دارد و نسبت بالاتری از C2S با نرخ هیدراسیون کندتر در مقایسه با بتن سیمان پرتلند معمولی دارد. بنابراین، توسعه مقاومت اولیه بتن حاوی SSP نسبت به بتن سیمان پرتلند معمولی با سرعت کندتری پیش می‌رود. با این حال، همانطور که فرآیند هیدراسیون SSP ادامه می‌یابد، میکروساختار بتن به‌طور تدریجی به تراکم می‌رسد [۹۴]، که منجر به افزایش مقاومت و کاهش تدریجی تفاوت‌ها در مقاومت بلندمدت می‌شود [۹۱].



شکل ۵- مقاومت فشاری بتن‌های SSP (با SCM الف GGBF، ب. SF).

به‌طور مشابه، آسیاب کردن بیشتر کلینکر برای افزایش مساحت سطح ویژه آن می‌تواند نرخ هیدراسیون را تسریع کرده و مقاومت فشاری بتن SSP را در مراحل اولیه و میانه هیدراسیون بهبود بخشد. مشابه بتن‌های فعال شده قلیایی، افزایش متوسط مقدار pH محیط نیز می‌تواند نرخ هیدراسیون اولیه را تسریع کند [۷۷]. با این حال، این امر همچنین بر اثر هیدراسیون بتن در مراحل بعدی تأثیر می‌گذارد و در نتیجه بر توسعه مقاومت در دوره هیدراسیون بعدی تأثیر می‌گذارد.

بر اساس مباحث ذکر شده، می‌توان نتیجه گرفت که چشم‌اندازهای افزودن SSP به‌عنوان یک SCM در بتن امیدوارکننده است. با این حال، توصیه می‌شود از استفاده از دوز بالای SSP به‌عنوان یک SCM مستقل خودداری شود به دلیل احتمال کاهش مقاومت.

۳-۴ دوام و دیگر ویژگی‌ها

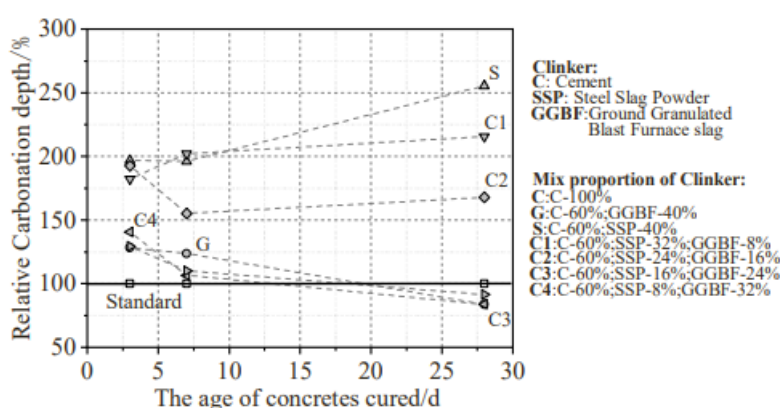
مشخص است که هر چه حجم منافذ مضر در بتن بیشتر باشد، سطح بیشتری برای واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی در دسترس است، که این امر باعث می‌شود مواد مختلف راحت‌تر وارد باطن بتن شوند. بنابراین، مقاومت بتن در برابر کربناسیون، خوردگی سولفات، نفوذ یون‌های کلر، و دیگر شاخص‌های دوام بتن، همچنین شاخص‌های عملکرد بلندمدت مانند انقباض خشک شدن، ارتباط نزدیکی با حجم منافذ در میکروساختار بتن دارند.

بر اساس تحلیلات و مباحث در بخش‌های ۳.۱ تا ۳.۳، در جامعه علمی توافق عمومی وجود دارد که افزودن SSP تأثیر منفی قابل توجهی بر مراحل بعدی هیدراسیون بتن ندارد. با این حال، این امر باعث افزایش قابل توجه حجم منافذ در مراحل اولیه و میانه هیدراسیون می‌شود. این اثر تأثیر قابل توجهی بر دوام و عملکرد بلندمدت بتن دارد. همانطور که در بخش ۲.۱ مطرح شد، هم نسبت w/b و هم دوز SSP تأثیر زیادی بر حجم منافذ بتن در مراحل اولیه و میانه هیدراسیون دارند. افزودن SCM‌های با فعالیت بالا یا فعال‌کننده‌ها می‌تواند به‌طور مؤثر نرخ هیدراسیون کلینکر را در مراحل اولیه و میانه تسریع کرده و برخی از اثرات منفی ناشی از افزودن SSP را جبران یا حتی معکوس کند. این مزایا از نظر دوام و عملکرد بلندمدت بتن SSP تأیید شده‌اند.

۳-۴-۱ کربناسیون

کربناسیون در بتن به فرآیندی اشاره دارد که در آن Ca(OH)_2 موجود در بتن با CO_2 موجود در محیط واکنش می‌دهد و منجر به تشکیل CaCO_3 و H_2O می‌شود. این واکنش شیمیایی معمولاً بر این باور است که مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد. با این حال، این فرآیند باعث تغییر بتن از حالت قلیایی به حالت خنثی می‌شود. در نتیجه، ظرفیت حفاظتی پوشش بتن برای میلگردها ضعیف می‌شود که خطر قابل توجهی برای اعضای بتن مسلح به همراه دارد.

یافته‌های تحقیقاتی نشان می‌دهند که افزودن SSP به بتن باعث افزایش عمق کربناسیون به‌طور قابل توجهی می‌شود. این اثر زمانی که بتن زمان پخت کوتاه‌تری دارد و نسبت w/b بالاتری دارد، بیشتر است [۸۸،۹۱]. با این حال، زمانی که SSP با برخی از SCM‌های با فعالیت بالا مانند GGBF [67,69,90] مخلوط شود، می‌تواند این اثر منفی را کاهش داده و حتی عمق کربناسیون بتن را کاهش دهد. شکل ۶ عمق کربناسیون بتن SSP با GGBF را در شرایط کربناسیون طبیعی طی سه سال نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که عمق کربناسیون گروه‌های C3 و C4 در مقایسه با بتن سیمان پرتلند معمولی در همان بازه زمانی کمتر است.



شکل ۶- عمق کربناسیون سه‌ساله بتن‌ها [90]

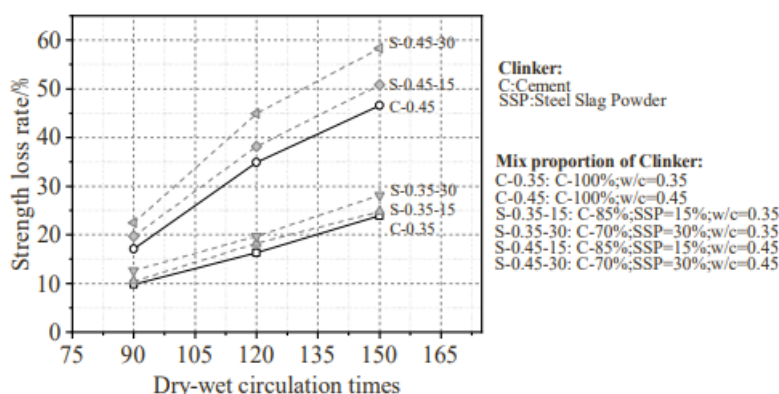
در واقع، تحقیقات نشان می‌دهند که تقریباً ۵۰٪ از عمق کل کربناسیون دو ساله بتن در ۵۶ روز اول اتفاق می‌افتد [۹۵]. بنابراین، کاهش مقاومت کربناسیون مشاهده‌شده در بتن SSP را می‌توان به افزایش حجم منافذ ناشی از افزودن SCM‌های با فعالیت بالا نسبت داد. در مقابل، افزودن SCM‌های با فعالیت بالا منجر به حجم منافذ مضر کمتری می‌شود که ساختار بتن را متراکم‌تر کرده و به‌طور قابل توجهی کربناسیون را در مراحل اولیه هیدراسیون زمانی که SSP وجود دارد، کاهش می‌دهد. با این حال، باید توجه داشت که بتن SSP با زمان پخت طولانی‌تر و نسبت w/b بالاتر عمق کربناسیون کمتری دارد. علاوه بر این، محتوای کمتر Ca(OH)_2 در بتن SSP که می‌تواند با CO_2 واکنش دهد، در مقایسه با بتن سیمان پرتلند معمولی، عامل دیگری است که به افزایش عمق کربناسیون بتن SSP کمک می‌کند [88,90]. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که از جایگزینی تنها سیمان با SSP در محیط‌های با CO_2 بالا خودداری شود. در عوض، SSP باید به‌طور ترکیبی با SCM‌های با فعالیت بالا استفاده شود تا از افزایش عمق کربناسیون ناشی از استفاده از آن جلوگیری شود.

۳-۴-۲ مقاومت در برابر خوردگی سولفات

سولفات‌ها پتانسیل واکنش با C-A-H و Ca(OH)_2 موجود در بتن را دارند. این واکنش منجر به تشکیل اترینگیت و گچ می‌شود که می‌تواند باعث انبساط و ترک خوردگی شود. این اثرات مضر به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه و مستندسازی قرار گرفته‌اند [96,97].

افزایش قابل توجه حجم منافذ در سنین اولیه که ناشی از افزودن SSP به بتن است، ممکن است اثر منفی بر مقاومت بتن در برابر خوردگی سولفات داشته باشد. با این حال، زمانی که مقدار کمی SSP (< 15%) به بتن و ملات با نسبت w/b پایین اضافه می‌شود، تأثیر آن بر مقاومت در برابر خوردگی سولفات قابل چشم‌پوشی است [۸۸]. با این حال، نسبت جایگزینی بالاتر SSP تأثیر منفی قابل توجهی بر مقاومت در برابر خوردگی سولفات در ملات و بتن با نسبت w/b بالا دارد [۴۳،۸۸،۹۰]. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، کاهش استحکام

مشاهده شده در گروه‌های S-0.35-30 و S-0.35-15 با گروه C-0.35 (3.4-17%) مشابه است. با این حال، گروه‌های S-0.45-30 و S-0.45-15 کاهش استحکام به‌طور قابل توجهی بیشتری در مقایسه با گروه C-0.35 نشان می‌دهند (۹-۲۵ درصد)



شکل ۷- نسبت کاهش مقاومت بتن‌ها تحت حمله سولفات‌ها [88]

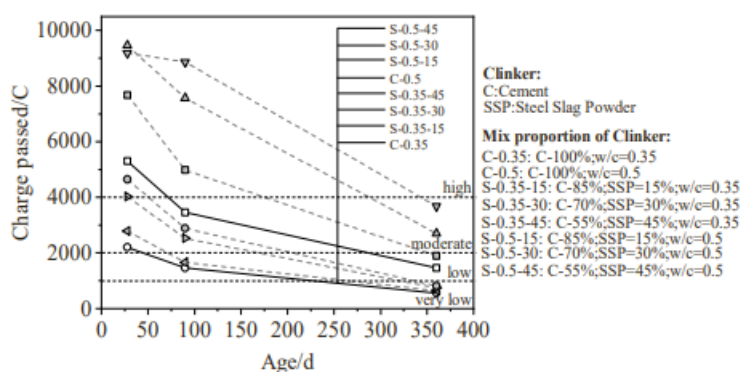
علاوه بر این، افزودن مقدار کمی SF می‌تواند به‌طور مؤثری اثرات منفی SSP بر مقاومت در برابر سولفات بتن را کاهش دهد. [67] در حالی که به‌طور کلی بر این باور است که افزودن SSP به بتن مقاومت آن را در برابر خوردگی سولفات ضعیف می‌کند، تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که هیدراسیون بلندمدت (۳ سال) بتن SSP باعث کاهش قابل توجهی در حجم منافذ می‌شود. این کاهش در حجم منافذ منجر به بهبود چشمگیر مقاومت در برابر خوردگی سولفات می‌گردد. [94]

با این حال، زمان پخت طولانی مورد نیاز برای بتن SSP قبل از استفاده، نتایج خوش‌بینی از نظر بهره‌وری و سود اقتصادی به ویژه در محیط‌های غنی از سولفات ارائه نمی‌دهد.

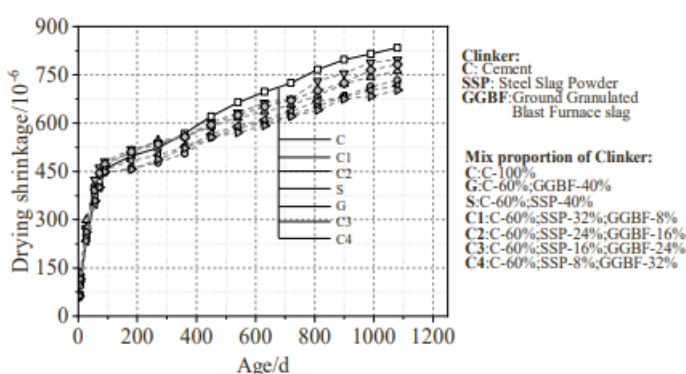
۳-۴-۳ مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلرید

وجود یون‌های کلرید در بتن می‌تواند خوردگی الکتروشیمیایی آرماتورهای فولادی را تسریع کند، با آسیب رساندن به فیلم محافظتی روی فلز و فراهم آوردن مسیر هدایت الکتریکی. مقاومت کمتر در برابر نفوذ یون کلرید تأثیر منفی قابل توجهی بر اعضای بتن آرمه دارد.

همان‌طور که در مقدمه بخش ۳.۴ پیش‌بینی شده است، تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن SSP به‌طور قابل توجهی می‌تواند نفوذپذیری بتن به یون‌های کلرید را افزایش دهد. این افزایش به‌ویژه در مخلوط‌های بتنی با نسبت w/b بالاتر (0.4 >) و در مراحل اولیه هیدراسیون (360 روز) که افزایش نفوذپذیری به‌طور قابل توجهی مشهود است، برجسته است [۸۸،۹۱]. تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن مقدار کمی FA به بتن SSP می‌تواند اثرات منفی بر مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید را کاهش دهد یا حتی خنثی کند، به‌ویژه در کوتاه‌مدت (۱۲۰ روز). علاوه بر این، هر چه محتوای FA در مخلوط ترکیبی بیشتر باشد، مقاومت بتن در برابر نفوذ یون‌های کلرید بیشتر تقویت می‌شود [۶۷]. بنابراین، ترکیب مناسب SCM‌ها در کاربردهای بتن دارای ارزش عملی زیادی است. (شکل‌های ۸ و ۹)



شکل ۸- نفوذپذیری بتن به یون کلرید [91]



[90] شکل ۹- انقباض های خشک شدن بتن ها

۴-۴-۳ انقباض خشک

انقباض خشک در بتن به انقباض حجمی اطلاق می شود که زمانی رخ می دهد که رطوبت داخلی به دلیل محیط بیرون پس از فرآیند سخت شدن بتن تبخیر می شود. در مخلوط های بتنی با نسبت w/b بالاتر، افزودن مقدار کمی (۱۵٪) از SSP تأثیر قابل توجهی بر انقباض خشک کوتاه مدت (< 90 روز) ندارد [۶۹]. با این حال، با افزایش نسبت جایگزینی SSP، به ویژه تحت شرایط رطوبت نسبی پایین [۴۳]، حجم منافذ در بتن به طور قابل توجهی افزایش می یابد که منجر به افزایش انقباض خشک می شود [۹۰]. درجه انقباض خشک به طور مثبت نسبت به مقدار SSP افزوده شده (در کوتاه مدت) افزایش می یابد. با این حال، افزودن SSP می تواند به طور قابل توجهی انقباض خشک بلندمدت بتن (> 360 روز) را کاهش دهد [۹۰].

علاوه بر این، زمانی که نسبت w/b پایین تر باشد، افزودن SSP تأثیر اندکی بر انقباض خشک کوتاه مدت دارد [۸۹]. هنگام تهیه یک مخلوط ترکیبی، مدیریت دقیق نسبت های SSP و انواع مختلف SCM های واکنشی بسیار مهم است. تحقیقات نشان داده اند که افزودن مقدار کمی SSP در ترکیب با GGBF می تواند به طور قابل توجهی انقباض خشک بتن را کاهش دهد [۹۰، ۹۳]. با این حال، افزودن مقدار کمی GGBF به بتن SSP ممکن است منجر به افزایش انقباض خشک شود [۹۰]. با این حال، انقباض خشک بلندمدت (> 360 روز) بتن-GGBF SSP همچنان کمتر از بتن سیمان پرتلند معمولی باقی می ماند.

ترکیب SSP در بتن می تواند بر کارایی آن تأثیر بگذارد. در حالی که این ترکیب می تواند اثر فعال داشته باشد، همچنین باعث کند شدن نرخ هیدراسیون مخلوط سیمان می شود که منجر به تمدید زمان گیرش به طور قابل توجهی می شود. علاوه بر این، بتن SSP معمولاً

در مقایسه با بتن سیمان پرتلند معمولی دارای مقاومت اولیه کمتری است. بنابراین، هنگام بررسی کاربرد SSP در مهندسی عملی، ضروری است که تأثیر آن بر برنامه زمانبندی پروژه و خطرات ایمنی احتمالی مورد توجه قرار گیرد.

استفاده از SSP به عنوان یک SCM در بتن از نظر اقتصادی و عملی دارای اهمیت است، زیرا اثربخشی و هزینه اثربخشی آن در درمان پیری طبیعی برای حذف f-CaO نشان داده شده است. با این حال، ضروری است توجه داشته باشیم که مقدار f-MgO و f-CaO در SSP متغیر است و این تغییرات تأثیر قابل توجهی بر پایداری حجمی بتن و ملات دارند. بنابراین، توصیه نمی‌شود که به نتایج آزمایش ترکیب شیمیایی از موارد مشابه قبلی در کاربردهای عملی تکیه کنیم. در عوض، ارزیابی ترکیب شیمیایی خاص SSP مورد استفاده ضروری است تا از مناسب بودن آن برای کاربرد مورد نظر اطمینان حاصل شود.

تحقیقات انجام شده در زمینه عملکرد مقاومت و دوام SSP نشان داده است که این ماده دارای ظرفیت هیدراسیون ضعیف‌تری است که منجر به کند شدن نرخ هیدراسیون و افزایش تخلخل بتن می‌شود. در نتیجه، در مراحل ابتدایی تا میانه هیدراسیون، عملکرد مقاومت و دوام بتن نسبت به بتن سیمان پرتلند معمولی کمتر است و شدت این اثر به طور مثبت با نسبت w/b مرتبط است. با این حال، اثرات منفی آن می‌تواند با استفاده از SCM های با فعالیت بالا و فعال‌کننده‌ها کاهش یابد یا حتی برطرف شود. بنابراین، SSP بیشتر برای ترکیب با بتن با عملکرد بالا به عنوان یک SCM ترکیبی با دوز پایین و همراه با SCM های با فعالیت بالا یا فعال‌کننده‌ها مناسب است. برعکس، استفاده از دوز بالا و کاربرد مستقل آن در بتن‌های معمولی یا با نسبت w/b بالا باید اجتناب شود. قابل توجه است که مقدار کمی از SSP به نظر می‌رسد که عملکرد مقاومت و دوام بلندمدت بتن حاوی SCM های با فعالیت بالا را تقویت کند.

اگر تحقیقات جامع‌تری این نتیجه‌گیری را تأیید کرده و محدوده کاربرد مناسب را تعیین کنند، استفاده گسترده از SSP در بتن ممکن است قریب‌الوقوع باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در واقع، تحقیقات تجربی قابل توجهی برای بررسی تأثیرات ترکیب سرباره فولادی (SS) در بتن به عنوان یک SCM و دانه‌های مصالح انجام شده است. این تحقیقات جنبه‌های مختلفی از جمله کارایی بتن، پایداری حجمی، خواص مکانیکی و عملکرد دوام بتن را مورد بررسی قرار داده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از SS در بتن رویکردی قابل اجرا و مقرون به صرفه است. از این تحقیقات می‌توان به نتایج زیر رسید:

SS یک محصول فرعی از فرآیند تولید فولاد است و ۹۹.۵٪ از SS می‌تواند بسته به فرآیند تولید به دو نوع طبقه‌بندی شود: سرباره کوره اکسیژن پایه (BOFS) و سرباره کوره قوس الکتریکی (EAFS). خواص سرباره فولادی به دلیل تفاوت‌های فرآیندهای تولید فولاد و مواد اولیه استفاده شده در کارخانه‌های فولاد مختلف به طور قابل توجهی متفاوت است. این تغییرات باعث می‌شود که تحلیل کمی تأثیر نسبت جایگزینی آن بر خواص بتن دشوار باشد.

هنگامی که پودر سرباره فولادی (SSP) به عنوان یک SCM در بتن ترکیب می‌شود، تمایل به بهبود کارایی بتن وجود دارد. با این حال، برخی مشکلات ممکن است به وجود آید، مانند تأخیر در گیرش، کاهش مقاومت اولیه و اثرات منفی بر پایداری حجمی و دوام بتن. با این حال، این مشکلات می‌توانند با استفاده از SCM های با فعالیت بالا به همراه فرآیندهای پیری کاهش یا حتی برطرف شوند. باید توجه داشت که به دلیل تغییرات قابل توجه در SSP به عنوان یک ماده زباله جامد، اتکا به نتایج تحقیقات آزمایشگاهی قبلی برای کاربردهای مهندسی توصیه نمی‌شود. قبل از استفاده از دسته جدیدی از SSP در پروژه‌های مهندسی واقعی، ضروری است که تحقیقات تجربی هدفمند بر روی خواص مکانیکی، پایداری حجمی، دوام و سایر ویژگی‌های مرتبط محصول حاصل (مانند بتن SSP یا ملات سیمانی SSP) انجام شود. طراحی و ساخت تنها بر اساس نتایج آزمایش‌های قبلی می‌تواند باعث بروز خطرات ایمنی غیرقابل کنترل شود.

کاربرد دانه‌های سرباره فولادی (SSA) به عنوان دانه در بتن ممکن است تأثیرات منفی بر کارایی، پایداری حجمی و مقاومت باقی‌مانده پس از مواجهه با دمای بالا داشته باشد. با این حال، این اثرات منفی می‌تواند با استفاده از فوق‌پلاستیک‌ها، فرآیندهای پیری مناسب و درمان‌های پیش‌گرمایش کاهش یا حتی حذف شوند. به طور کلی، ترکیب SSA تأثیر مثبتی بر مقاومت بتن در دمای اتاق دارد، با چند مورد استثنا. تأثیر SCM های مختلف) مانند SF، FA و GGBF بر بتن SSA می‌تواند متفاوت باشد. از نظر رابطه تنش-کرنش بتن، SSCA می‌تواند مدول الاستیسیته و کرنش در تنش اوج را افزایش دهد، در حالی که SSFA ممکن است برخی اثرات منفی بر مدول الاستیسیته داشته باشد. برخلاف سایر خواص، تأثیر SSA بر دوام بتن به شدت تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند خواص فیزیکوشیمیایی SSA، نسبت‌های اختلاط بتن، اندازه ذرات دانه، دانه‌بندی و غیره قرار دارد. با این حال، تحقیقات محدودی که در حال حاضر موجود است، نتایج واضحی در این زمینه ارائه نمی‌دهد.

برای اطمینان از پایداری حجمی بتن SSP، باید درمان تثبیت و آزمایش پایداری بر روی SSP انجام شود، به طوری که فعال‌کننده‌ها (مانند $CaCl_2$ و سایر انواع مواد سیمانی مکمل) مانند GGBF، (FA برای تسریع زمان گیرش و تقویت مقاومت اولیه به آن اضافه شود. به طور اصولی، SSP نباید به تنهایی استفاده شود. به طور همزمان، نرخ جایگزینی SSP در بتن نباید به طور افراطی بالا باشد. برای تعادل کارایی، عملکرد مکانیکی، دوام و بهره‌برداری بهینه، نرخ جایگزینی بهینه معمولاً در محدوده ۱۰٪ تا ۳۰٪ در کاربردهای مهندسی قرار دارد.

مراجع

- [1] Das, B., Prakash, S., Reddy, P. S. R., & Misra, V. N. (2007). An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 40–57. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.008> (accessed May 23, 2025).
- [2] Yüksel, I. (2017). A review of steel slag usage in construction industry for sustainable development. *Environmental Development*, 22, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.01.003> (accessed May 23, 2025).
- [3] Guo, M. Z., Zhang, H. R., Tang, Y. P., & Xiao, B. (2018). Review of steel slag utilization in China. *Procedia Environmental Science*, 31, 491–496. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.068> (accessed May 23, 2025).
- [4] Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., & Chen, H. (2012). An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environmental Science*, 16, 791–801. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108> (accessed May 23, 2025).
- [5] Lu, H., Zhang, W., Li, G., & Wang, X. (2021). A cleaner process for selective recovery of valuable metals from basic oxygen furnace slag. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123874. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123874> (accessed May 23, 2025).
- [6] Nguyen, T. A. H., Phan, D. N., & Lee, B. K. (2022). Heavy metal removal using BOF slag: A review of mechanisms and performance. *Journal of Hazardous Materials*, 429, 128347. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128347> (accessed May 23, 2025).
- [7] Shi, C., Meyer, C., & Behnood, A. (2004). Utilization of steel slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), 243–256. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.02.001> (accessed May 23, 2025).
- [8] Hayashi, M., Murakami, S., & Oikawa, K. (2014). Long-term performance of steelmaking slag as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 66, 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.057> (accessed May 23, 2025).
- [9] Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Construction and Building Materials*, 25(2), 942–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.070> (accessed May 23, 2025).
- [10] Guo, M., Zhang, H., Yu, X., & Zhang, Y. (2018). Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Management*, 78, 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.038> (accessed May 23, 2025).
- [11] Jiang, Y., Ling, T.-C., Shi, C., & Pan, S.-Y. (2017). Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023> (accessed May 23, 2025).
- [12] Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menad, N., Lidstrom Larsson, M., & Bjorkman, B. (2007). Characteristics of steel slag under different cooling conditions. *Waste Management*, 27(10), 1335–1344. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.09.027> (accessed May 23, 2025).
- [13] Yu, J., Sun, Y., Wang, Z., & Wang, J. (2022). Influence of carbonation on the leaching behavior of BOF slag. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107426. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107426> (accessed May 23, 2025).
- [14] Masindi, V., Gitari, W. M., Tutu, H., & De Beer, M. (2021). Application of steel slag in wastewater treatment: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101898. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101898> (accessed May 23, 2025).

- [15] Liu, C., Zhang, Y., Wang, C., Tang, Y., Zhang, J., & Liu, D. (2022). Effects of steel slag as fine aggregate on static and dynamic mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 314, 125607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125607> (accessed May 23, 2025).
- [16] Zhang, T., Li, Y., Shi, C., Zhang, Z., & Ou, Z. (2022). Feasibility of using electric arc furnace oxidizing slag in high-performance concrete. *Journal of Cleaner Production*, 331, 129963. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129963> (accessed May 23, 2025).
- [17] Li, Y., Sun, S., Liu, S., & Shi, C. (2023). Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135648. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135648> (accessed May 23, 2025).
- [18] De Brito, J., & Saikia, N. (2013). *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*. Springer-Verlag London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4542-2> (accessed May 23, 2025).
- [19] Qasrawi, H. Y., & Asi, I. M. (2006). Effect of bitumen grade on hot asphalt mixes properties prepared with steel slag aggregate. *Construction and Building Materials*, 20(12), 1120–1127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.002> (accessed May 23, 2025).
- [20] Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1–3), 300–305. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.109> (accessed May 23, 2025).
- [21] Xue, Y., Wu, S., Hou, H., & Zha, J. (2006). Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture. *Journal of Hazardous Materials*, 138(2), 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.064> (accessed May 23, 2025).
- [22] Shen, D.-H., Du, J.-C., & Lin, C.-H. (2009). Evaluation of eco-friendly concrete using industrial by-products by means of experimental design and performance optimization. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(3), 435–448. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.06.002> (accessed May 23, 2025).
- [23] Zhao, J., Guo, X., Wang, S., & Liu, N. (2018). Utilization of steel slag for cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 189, 506–524. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.197> (accessed May 23, 2025).
- [24] Roy, D. M., & Idorn, G. M. (1982). Hydration, structure, and properties of blast furnace slag cements, mortars, and concrete. *ACI Journal Proceedings*, 79(6), 444–457. <https://doi.org/10.14359/10999> (accessed May 23, 2025).
- [25] Mo, L., & Panesar, D. K. (2013). Effects of accelerated carbonation on the microstructure of Portland cement pastes blended with slag. *Cement and Concrete Research*, 43, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.006> (accessed May 23, 2025).
- [26] Aparicio, S., & Alañón, A. (2016). Use of steel slag in concrete mixtures. *Materials and Structures*, 49(11), 4515–4525. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0771-0> (accessed May 23, 2025).
- [27] Zhu, J., Yu, Y., Liu, J., Wang, Z., & He, X. (2021). A review of steel slag utilization in asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 273, 121765. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121765> (accessed May 23, 2025).
- [28] Shen, W., Wu, H., Duan, H., & Yang, Y. (2009). The use of steel slag in asphalt concrete. *Waste Management*, 29(2), 791–795. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.014> (accessed May 23, 2025).
- [29] Manso, J. M., Polanco, J. A., Losanez, M., & Gonzalez, J. J. (2006). Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 28(6), 528–534. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.03.005> (accessed May 23, 2025).
- [30] Pellegrino, C., & Gaddo, V. (2009). Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 663–671. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.001> (accessed May 23, 2025).
- [31] Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menad, N., Larsson, M. L., & Björkman, B. (2007). Characteristics of steel slag under different cooling conditions. *Waste Management*, 27(10), 1335–1344. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.08.001> (accessed May 23, 2025).
- [32] Shen, D. H., & Du, J. C. (2004). Steel slag recycling in cement concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.04.001> (accessed May 23, 2025).
- [33] Brand, A. S., & Roesler, J. R. (2008). Utilization of steel slag in concrete as coarse aggregate. *ACI Materials Journal*, 105(6), 601–609. <https://doi.org/10.14359/20168> (accessed May 23, 2025).
- [34] Pasetto, M., & Baldo, N. (2010). Experimental evaluation of high-performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace slag. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1–3), 938–948. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.115> (accessed May 23, 2025).
- [35] Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., Chen, Y., & Li, N. (2007). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, 42(7), 2580–2585. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.032> (accessed May 23, 2025).
- [36] Pavez, O., Pérez, P., & Vásquez, J. (2021). Application of steel slag in construction materials: A review. *Journal of Environmental Management*, 287, 112238. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112238> (accessed May 23, 2025).
- [37] Neto, F. C., Ribeiro, D. V., & Labrincha, J. A. (2015). Alkali-activated binders based on steel slags: A review. *Materials Research*, 18(6), 1375–1386. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.030115> (accessed May 23, 2025).

- [38] Shi, C. (2004). Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230–236. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230)) (accessed May 23, 2025).
- [39] De Azevedo, A. R. G., Marvila, M. T., de Oliveira, L. B., Vieira, C. M. F., & Monteiro, S. N. (2021). Reuse of steel slag in the production of cementitious composites: An overview. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 962–979. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.036> (accessed May 23, 2025).
- [40] Xue, Y., Wu, S., Hou, H., & Zha, J. (2006). Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture. *Journal of Hazardous Materials*, 138(2), 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.072> (accessed May 23, 2025).
- [41] Das, B., Prakash, S., Reddy, P. S. R., & Misra, V. N. (2007). An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 40–57. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.008> (accessed May 23, 2025).
- [42] Lin, K. L., Chang, W. C., Lin, D. F., Luo, H. L., & Tsai, M. C. (2008). Effects of steel slag on the strength and absorption properties of mortars and concrete. *Construction and Building Materials*, 22(9), 205–210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.02.005> (accessed May 23, 2025).
- [43] Qasrawi, H. Y. (2014). The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment. *Construction and Building Materials*, 54, 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067> (accessed May 23, 2025).
- [44] Babu, D. S., & Kumar, S. (2000). Efficiency of GGBS in concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1031–1036. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00257-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00257-4) (accessed May 23, 2025).
- [45] Pellegrino, C., & Gaddo, V. (2009). Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 663–671. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.001> (accessed May 23, 2025).
- [46] Manso, J. M., Polanco, J. A., Losanez, M., & Gonzalez, J. J. (2006). Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 28(6), 528–534. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.03.003> (accessed May 23, 2025).
- [47] Qasrawi, H. Y., & Asi, I. M. (2006). Effect of bitumen grade on hot asphalt concrete mixture properties. *Construction and Building Materials*, 20(7), 1158–1164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.04.043> (accessed May 23, 2025).
- [48] Brand, A. S., Roesler, J. R., & Salas, A. (2016). Use of steel slag aggregate in pavement concrete. *Journal of Transportation Engineering*, 142(3), 04015051. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000803](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000803) (accessed May 23, 2025).
- [49] Shi, C., Qian, J., & Khayat, K. H. (2009). A critical review on the chemical durability of alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 39(9), 822–829. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.004> (accessed May 23, 2025).
- [50] Lin, K. L., Wang, K. S., Tuan, B. C., & Lo, S. H. (2008). Slag-based geopolymer for the immobilization of lead and zinc. *Journal of Hazardous Materials*, 157(2–3), 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.009> (accessed May 23, 2025).
- [51] Wang, S. D., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 1033–1043. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90026-4) (accessed May 23, 2025).
- [52] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1315–1322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.019> (accessed May 23, 2025).
- [53] Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., & Vázquez, T. (2003). Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research*, 33(12), 2031–2036. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00215-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00215-1) (accessed May 23, 2025).
- [54] Behfarnia, K., & Rostami, M. (2017). An assessment on parameters affecting the properties of geopolymer mortars containing pumice-type natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 145, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.218> (accessed May 23, 2025).
- [55] Wang, K., Shah, S. P., Mishulovich, A., & Norman, T. (2004). Fiber-reinforced concrete with application in earthquake-resistant structures: state-of-the-art review. *ACI Materials Journal*, 101(4), 304–317. <https://doi.org/10.14359/13460> (accessed May 23, 2025).
- [56] Altwair, N. M., Kabir, S., & Johari, M. A. M. (2012). The effect of steel fibre content on the mechanical and durability properties of green concrete containing ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 35, 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.080> (accessed May 23, 2025).
- [57] Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001> (accessed May 23, 2025).
- [58] Ranjbar, N., Kuenzel, C., & Zhang, M. H. (2020). Fibre-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 107, 103498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498> (accessed May 23, 2025).
- [59] Bernal, S. A., San Nicolas, R., Provis, J. L., Mejía de Gutiérrez, R., van Deventer, J. S. J., & Rose, V. (2014). Natural carbonation of aged alkali-activated slag concretes. *Materials and Structures*, 47(4), 693–707. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0091-3> (accessed May 23, 2025).

- [60] Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023> (accessed May 23, 2025).
- [61] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T. (2007). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.01.001> (accessed May 23, 2025).
- [62] Bakharev, T. (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1134–1147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.022> (accessed May 23, 2025).
- [63] Pan, Z., Sanjayan, J. G., & Rangan, B. V. (2011). An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. *Journal of Materials Science*, 46(3), 855–863. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4864-6> (accessed May 23, 2025).
- [64] Ke, X., Bernal, S. A., Provis, J. L. (2015). Uptake of CO₂ in alkali-activated slag/metakaolin pastes during accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*, 73, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.007> (accessed May 23, 2025).
- [65] Ling, Y., Wei, Y., Wei, L., Ji, Y., & Ji, X. (2019). Effects of carbonation on mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash-slag pastes. *Construction and Building Materials*, 198, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.203> (accessed May 23, 2025).
- [66] Ye, H., Radlińska, A., & Shi, X. (2017). Carbonation of alkali-activated materials: A review. *Construction and Building Materials*, 135, 539–548. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.165> (accessed May 23, 2025).
- [67] Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejía de Gutiérrez, R., & Provis, J. L. (2012). Performance of alkali-activated slag mortars exposed to acids. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1(3), 138–150. <https://doi.org/10.1080/21650373.2012.744895> (accessed May 23, 2025).
- [68] Temuujin, J., Minjigmaa, A., Lee, M., Chen-Tan, N., & van Riessen, A. (2009). Fly ash based geopolymer thin coatings on metal substrates and its thermal evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 180(1–3), 748–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.116> (accessed May 23, 2025).
- [69] He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., & Zhang, G. (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 37, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.010> (accessed May 23, 2025).
- [70] Li, Z., Lu, Y., Bai, Y., & Yu, X. (2020). Effects of nano-silica on early-age properties of geopolymer pastes. *Construction and Building Materials*, 231, 117146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117146> (accessed May 23, 2025).
- [71] Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*, 25(2), 575–581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024> (accessed May 23, 2025).
- [72] Nath, P., & Sarker, P. K. (2012). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080> (accessed May 23, 2025).
- [73] Allahverdi, A., & Najafi Kani, E. (2009). Use of natural pozzolans in geopolymer cements. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 6(2), 23–30. <https://doi.org/10.22068/IJSME.06.2.23> (accessed May 23, 2025).
- [74] Tchakouté, H. K., Djobo, J. N. Y., Rüscher, C. H., & Kamseu, E. (2017). A review of the progress and challenges in the development of geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 135, 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.183> (accessed May 23, 2025).
- [75] Mejía de Gutiérrez, R., & Puertas, F. (2008). Alkali-activated fly ash mortars with high mechanical strength for repair applications. *ACI Materials Journal*, 105(5), 487–493. <https://doi.org/10.14359/19927> (accessed May 23, 2025).
- [76] Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750–763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016> (accessed May 23, 2025).
- [77] Tchakouté, H. K., Djobo, J. N. Y., & Rüscher, C. H. (2017). Mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer mortars exposed to thermal shock. *Ceramics International*, 43(9), 6982–6990. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.02.051> (accessed May 23, 2025).
- [78] Olivia, M., & Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design*, 36, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.035> (accessed May 23, 2025).
- [79] Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Cement and Concrete Composites*, 55, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.008> (accessed May 23, 2025).
- [80] Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009> (accessed May 23, 2025).

- [81] Li, C., Sun, H., & Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1341–1349. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020> (accessed May 23, 2025).
- [82] Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2014). Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 62, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.012> (accessed May 23, 2025).
- [83] Zhang, Z., Yao, X., & Zhu, H. (2010). Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete II. Microstructure and anticorrosion mechanism. *Applied Clay Science*, 49(1–2), 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.01.012> (accessed May 23, 2025).
- [84] Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). One-part alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 103, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001> (accessed May 23, 2025).
- [85] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845696382> (accessed May 23, 2025).
- [86] Pires, A. A., Pereira, E. M., & Figueiredo, E. (2015). Geopolymers as alternative materials for concrete production. *Construction and Building Materials*, 94, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.008> (accessed May 23, 2025).
- [87] Bush, A. D., & Li, W. (2018). Geopolymerization of fly ash with sodium silicate: Mechanisms and applications. *Journal of Materials Science*, 53(15), 10542–10551. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2262-6> (accessed May 23, 2025).
- [88] Rickard, W. D. A., & van Deventer, J. S. J. (2012). Effect of curing temperature on the mechanical properties of geopolymers. *Journal of Materials Science*, 47(2), 714–724. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-6079-4> (accessed May 23, 2025).
- [89] Duxson, P., & van Deventer, J. S. J. (2007). The effect of chemical composition on the thermal properties of geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3355–3364. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0279-5> (accessed May 23, 2025).
- [90] Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). High-strength alkali-activated fly ash binders: A review. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 983–992. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017> (accessed May 23, 2025).
- [91] Duan, P., & Zhang, L. (2016). The effect of curing temperature on the properties of alkali-activated slag and fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 68, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.01.008> (accessed May 23, 2025).
- [92] Usman, M., & Sarsam, R. A. (2019). Study on the mechanical properties of geopolymer concrete with various aggregates. *Construction and Building Materials*, 211, 313–323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.148> (accessed May 23, 2025).
- [93] Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., & del Monte, F. (2013). Effect of the curing temperature on the mechanical properties of geopolymer concrete. *Cement and Concrete Research*, 50, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.02.002> (accessed May 23, 2025).