

مطالعه بر روی خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل با نفوذپذیری زیاد با استفاده از سرباره آلومینیوم

کیانمهر هاشمی پور

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

محمدرضا محمدی زاده *

دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

چکیده

بازیافت اصولی و استفاده مجدد از زباله‌های صنعتی یکی از اساسی‌ترین چالش‌های انسانی برای محافظت از محیط زیست است. در سال‌های اخیر به دلیل خواص منحصر به فرد بتن متخلخل، استفاده از روسازی بتنی متخلخل به عنوان جایگزین مناسبی برای رویه‌های آسفالتی مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه به منظور امکان سنجی روشی جدید برای ساخت روسازی‌های بتنی متخلخل با نفوذپذیری زیاد سازگار با محیط زیست با جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درصد وزنی سیمان، نمونه‌های بتن ساخته و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، درصد جذب آب، نفوذپذیری و تخلخل قرار گرفتند. نتایج نشان داد با جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۵ درصد از وزن سیمان، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و درصد جذب آب نسبت به نمونه شاهد دارای تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌باشد. اما با جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درصد از وزن سیمان، مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۱۶، ۲۴ و ۵۰ درصد و مقاومت خمشی به ترتیب به میزان ۶، ۱۵ و ۲۴ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. با جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان، میزان نفوذپذیری در نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد به ترتیب به میزان ۶۱ و ۹۷ درصد افزایش یافته است. همچنین مشاهده گردید که با توجه به تخلخل بسیار زیاد نمونه‌های حاصل از جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۳۰ درصد از وزن سیمان، آب بلافاصله و به سرعت از آنها عبور می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: سرباره آلومینیوم، بازیافت، پسماندهای صنعتی، بتن متخلخل، نفوذپذیری، خصوصیات مکانیکی.

* نویسنده مسئول: mrz_mohammadizadeh@hormozgan.ac.ir

۱- مقدمه

در مطالعه‌ای الینوا^۱ و همکاران [۵] به جهت استفاده از سرباره آلومینیوم به‌عنوان جایگزین درصدی از سیمان مورد نیاز ساخت بتن، مشاهده نمودند که تماس سرباره آلومینیوم با آب موجب تولید گازهای چون H_2 ، H_2S ، CH_4 ، NH_3 و PH_3 می‌شود که این مسئله باعث ایجاد تعداد بسیار زیادی حباب گاز با قطرهای مختلف درون بتن می‌گردد. همچنین در این مطالعه نتایج نشان داد که مقاومت فشاری و خمشی بتن با جایگزینی ضایعات آلومینیومی با ۱۰-۱۵٪ از وزن سیمان تقریباً برابر با مقادیر متناظر در نمونه بتن شاهد است. همچنین مشخص شد که بتن ساخته شده با ضایعات آلومینیومی زمان گیرش بتن را به تأخیر می‌اندازد که برای شرایط اجرای بتن در هوای گرم مفید است. ایوازی^۲ و همکاران [۶] طی پژوهشی با جایگزینی رسوبات و ضایعات سرباره آلومینیوم به ترتیب به عنوان منابع CaO و Al_2O_3 به تولید سیمان آلومینات کلسیم پرداختند. آنها خصوصیات سیمان تولید شده در دماهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند. ویلسون^۳ [۷] از سرباره آلومینیوم به عنوان پرکننده در تولید بتن بدون تراکم، آجرهای بتنی و کاشی‌های بتنی سقف استفاده کردند.

از سوی دیگر، یکی از مهم ترین سرمایه‌های ملی در هر کشوری، جاده‌های موجود در آن کشور محسوب می‌شود. در سالیانه گذشته جایگزینی رویه‌های بتنی متخلخل با رویه‌های آسفالتی با توجه به نفوذپذیری بالای آنها که موجب مزایای چون مدیریت سیلاب‌ها، جذب و کنترل روان آب‌های سطحی، حذف آلودگی‌های موجود در آنها و انتقال به سفره آب‌های زیرزمینی و دوام بالا در برابر سیکل‌های ذوب-انجماد مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۸]. از جمله کارهای تحقیقاتی انجام شده در خصوص بتن متخلخل، می‌توان به تعدادی از موارد شاخص در زیر اشاره نمود. نقطه ضعف عمده بتن متخلخل، مقاومت کم می‌باشد و مقاومت مکانیکی بتن متخلخل به میزان قابل ملاحظه‌ای پایین تر از بتن معمولی است. مقاومت مکانیکی پایین سبب شده است که از روسازی بتنی ساخته شده از این نوع بتن تنها بتوان تنها در مناطق کم ترافیک استفاده شود [۹]. نیتلا^۴ و همکاران [۱۰] در تحقیقی با توجه به لزوم افزایش مقاومت در کنار نفوذپذیری مناسب بتن متخلخل، به بهینه سازی روش ساخت بتن متخلخل پرداختند. نتایج

گسترش کارخانه‌های صنعتی، منافع و سوددهی اقتصادی را برای کشورها به همراه خواهد داشت. اما این توسعه پیامدهای مضرری چون افزایش تولید پسماندهای خطرناک و ورود آلودگی‌های ناشی از آنها به منابع خاک، آب و هوا در محیط زیست را به همراه خواهد داشت. تولید ضایعات و پساب‌های صنعتی حاوی فلزهای سنگین بوده و نفوذ آن به محیط زندگی و چرخه غذایی انسان و جانداران از خطرناکترین پیامدهای آلودگی‌های صنعتی می‌باشد. با بررسی داده‌های آماری تخمین زده می‌شود سالانه میلیون‌ها تن سرباره در صنایع مختلف تولید می‌شود. برای نمونه به ازای هر تن مس تولید شده، حدود ۲/۲ تن سرباره و تقریباً ۳۷/۷ میلیون تن سالانه و حدود ۱۲۰ میلیون تن سرباره آلومینیوم در سراسر جهان تولید می‌شود [۱،۲].

به دلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سرباره آهن، مس و آلومینیوم به عنوان یک محصول جانبی حاصل از بازیافت می‌توان از آنها در بتن به عنوان جایگزینی از درصد وزنی سیمان به عنوان یک راه حل پایدار برای کاهش استفاده از منابع طبیعی و محل‌های دفن زباله برای دفع بازیافت استفاده کرد [۳]. بنابراین کاهش دفع زباله با استخراج فلزات با ارزش از پسماندهای سرباره در یک اقتصاد رو به توسعه به طور فزاینده‌ای ضروری است. اقتصاد رو به توسعه شامل استراتژی‌های پردازش پایدار برای ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از فناوری‌های تولید پاک‌تر و کارآمدتر و همچنین توسعه استراتژی‌های بازیافت موثر برای حل مشکلات تامین فلز و دفع زباله «تولید، استفاده و بازیافت» است. صنعت آلومینیوم سازی با توجه به نیاز روزافزون صنایع مختلف به فلز آلومینیوم به سرعت در حال گسترش می‌باشد [۴].

اما مشکل اصلی این توسعه، تولید پسماندهای بسیار خطرناک از فرایند تولید آلومینیوم است. سرباره آلومینیوم محصول جانبی تولید آلومینیوم است. در حال حاضر انرژی بیشتری برای بازیابی آلومینیوم از سرباره مصرف می‌شود. در مواجهه با به حداقل رساندن پیامدهای زیست محیطی این پسماندها، انتخاب و به کار گیری مناسب‌ترین روش مدیریت این ضایعات صنعتی ضروری است.

3 Wilson
4 Neithalath

1 Elinwa
2 Ewais

سیمان پرتلند (PCPC^۵) که با حذف بیشتر یا تمام سنگدانه های ریز تولید می شوند، پرداختند. استفاده تنها از سنگدانه های درشت منجر به ایجاد فضاهای خالی به هم پیوسته در ماتریس بتن سخت شده و این فضاهای خالی به بتن اجازه می دهد تا آب را با سرعت نسبتاً بالایی از خود انتقال دهد. آنها در پژوهش خودشان به بررسی تأثیر اندازه سنگدانه درشت بر مشخصات مکانیکی و دوام نمونه ها پرداختند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از سنگدانه های کوچکتر باعث ایجاد مقاومت فشاری بالاتر در بتن متخلخل می شود. همچنین حداکثر مقاومت فشاری حاصل شده در این تحقیق ۶/۹۵ مگاپاسکال بود که با استفاده از سنگدانه درشت با اندازه یکسان به قطر ۹/۵ میلیمتر بدست آمد.

تورس^۶ و همکارانش [۱۵] در پژوهشی به ارزیابی بتن متخلخل با مقاومت بالا که با مواد محلی در دسترس ساخته شد، پرداختند. آنها در این مطالعه به بررسی تأثیر چهار پارامتر شامل قطر سنگدانه های درشت با دو اندازه متفاوت (۹/۵۴ و ۶/۳۵ میلی متر)، تراکم نمونه های بتنی، نسبت آب به سیمان و دوده سیلیس بر مقاومت بتن متخلخل پرداختند. آنها با استفاده از مواد محلی و بدون استفاده از الیاف و پلیمر موفق به ساخت بتن متخلخل با مقاومت فشاری مناسب و در محدوده ۲۱ تا ۱۵ مگاپاسکال و همچنین با تخلخل در محدوده ۱۹٪ تا ۳۲٪ و میزان نفوذ ۱/۹ تا ۵/۸ میلیمتر بر ثانیه شدند.

در پژوهش دیگری فنک^۷ و همکاران [۱۶] توانستند با جایگزینی خاکستر پوسته برنج با ۳۱ درصد وزن سیمان، بتن متخلخل تولید نمایند. آنها با نسبت آب به مواد سیمانی به میزان ۰/۲۱ و انجام آزمایش های مقاومت فشاری، نفوذپذیری بر روی نمونه ها و همچنین بررسی ریز ساختار بتن متخلخل ساخته شده با بهره گیری از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM^۸، موفق به بهبود دوام بتن متخلخل شدند. تاجیک^۹ و همکارش [۱۷] در پژوهشی سعی به ارائه رابطه بین تخلخل و میزان نفوذپذیری بتن متخلخل نمودند. آنها در این مطالعه با چهار نسبت آب به سیمان و دو اندازه مختلف سنگدانه به ساخت نمونه های بتنی متخلخل پرداختند. نتایج آنها

آنها نشان داد با اجرای مناسب و استفاده از مواد افزودنی و ترکیبات خاص در ساخت روسازی های بتنی متخلخل، این نوع روسازی بتنی می تواند با تخلخل ۳۵ تا ۱۵ درصد، دارای مقاومت فشاری بین ۴ تا ۲۸ مگاپاسکال باشد.

با توجه به لزوم ساخت بتن بادوام و سازگار با محیط زیست، دی مورا^۱ و همکاران [۱۱] به بررسی تأثیر افزودن پودر شیشه بازیافتی و فوق روان کننده بر خواص مکانیکی و میزان نفوذپذیری بتن متخلخل پرداختند. آنها با افزودن پودر شیشه بازیافتی به میزان ۳۴ درصد وزن سیمان و ۱ درصد فوق روان کننده توانستند مقاومت فشاری بتن متخلخل معمولی که ۱۱ مگاپاسکال بود را بهبود بخشیده و تا ۲۳ مگاپاسکال افزایش دهند. بتن متخلخل حاصله علاوه بر نفوذپذیری مناسب دارای مشخصات مکانیکی بالاتری نسبت به نمونه شاهد بود. وانگ^۲ و همکارانش [۱۲] در پژوهشی به بهینه سازی و ارزیابی مقاومت فشاری، دوام و نفوذپذیری بتن متخلخل ساخته شده با خاکستر بادی و نانو سیلیس پرداختند. آنها از طریق استفاده همزمان از خاکستر بادی و نانو سیلیس موفق به ساخت بتن متخلخلی با مقاومت فشاری ۱۷ مگاپاسکال و مقاومت در برابر سایش کمتر از ۳۰ درصد کاهش وزن و همچنین کنترل حجم رواناب (تراوایی بیش از ۸ میلی متر بر ثانیه) شدند.

چاندراپا^۳ و همکارانش [۱۳] در تحقیق خود با استفاده از آزمایش افت هد آب به ارزیابی تأثیر اندازه سنگدانه یا دانه بندی سنگدانه ها و نسبت آب به سیمان بر خاصیت نفوذپذیری بتن های متخلخل پرداختند. سنگدانه های مورد استفاده در این مطالعه شامل چهار اندازه سنگدانه درشت با حداکثر قطر: ۶/۷، ۹/۵، ۱۳/۲ و ۱۹ میلی متر می باشد. نتایج ارزیابی آنها بر ۱۸ طرح اختلاط مختلف منجر به ساخت نمونه های با تخلخل ۱۵-۳۷٪ و نفوذپذیری در محدوده ۰/۰۷۶ تا ۳/۵ سانتی متر بر ثانیه شد. همچنین نتایج آنها نشان داد با افزایش نفوذپذیری سرعت افت هد آب افزایش می یابد و نسبت سنگدانه به سیمان از تأثیر بیشتری بر نفوذپذیری بتن متخلخل در مقایسه با نسبت آب به سیمان برخوردار می باشد.

یمین^۴ و همکاران [۱۴] به بررسی بتن های متخلخل ساخته شده با

5 Portland Cement Pervious Concrete
6 Torres
7 Fang
8 Scanning Electron Microscopy
9 Tajik

1 De Moura
2 Hwang
3 Chandrappa
4 Yamin

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان تیپ II هرمزگان

ترکیبات شیمیایی	درصد %	
	Min	Max
SiO ₂	۲۰/۵	۲۲
AL ₂ O ₃	۴/۶	۵/۳
F ₂ O ₃	۳/۵	۴
CaO	۶۳	۶۵
MgO	۱/۵	۲/۵
SO ₃	۱/۵	۲/۵
L.O.I	۱	۲/۵

در این مطالعه شن نخودی و بادامی از معادن واقع در اطراف بندرعباس و ماسه طبیعی مصرفی از معادن شهر میناب تهیه گردیده اند. همچنین حداکثر اندازه سنگدانه های شن به ۱۹ میلیمتر محدود شده است. از آنجا که در طرح اختلاط بتن، فرض بر این است که سنگدانه‌ها هیچ میزان آبی جذب و نه آبی را به بتن اضافه می‌کنند و در حالت اشباع با سطح خشک SSD هستند. لذا در این مطالعه بر اساس استانداردهای ASTM C127-88 و ASTM C55 درصد جذب آب و درصد رطوبت مصالح سنگدانه ای، پیش از استفاده در ساخت بتن تعیین گردید [۲۰، ۲۱]. همچنین آزمایش دانه‌بندی مصالح بر اساس استاندارد ASTM C33 صورت گرفت [۲۲]. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح سنگدانه‌ای در جداول شماره ۲ تا ۴ و شکل های ۱ و ۲ ارائه شده اند. در جدول شماره ۲، نتایج آزمایشات برای تعیین درصد رطوبت، درصد جذب آب و چگالی مصالح سنگی آمده است. نتایج آزمایش دانه بندی برای مصالح شن و ماسه به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. همچنین نتایج آزمایش دانه بندی مصالح شن و ماسه به ترتیب در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی

مصالح	درصد رطوبت (%)	درصد جذب آب (%)	چگالی (gr/cm ³)
شن بادامی	۰/۲	۰/۹	۲/۶۰۸
ماسه	۱/۳۵	۲/۴	۲/۵۲۳

نشان داد که ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل بتن متخلخل ساخته شده با سنگدانه درشت‌تر، بزرگتر از بتن متخلخل ساخته شده با سنگدانه ریزتر می‌باشد. همچنین آنها موفق به ارائه یک مدل رگرسیون به همراه تجزیه و تحلیل واریانس جهت ارائه رابطه بین درصد تخلخل و ضریب نفوذپذیری بتن متخلخل شدند. در تحقیقات انجام شده در قبل برای ایجاد تخلخل در بتن به منظور ایجاد خاصیت نفوذپذیری از یک یا ترکیب دو اندازه متفاوت سنگدانه درشت استفاده شده است. این در حالی است که در مطالعه حال حاضر از سنگدانه‌های ریز و درشت دانه مطابق با استاندارد ASTM C33 (دانه بندی کامل) و جهت ایجاد تخلخل در بتن از جایگزینی سرباره آلومینیوم با درصدی از وزن سیمان استفاده گردید. به عبارت دیگر هدف از انجام این مطالعه، ساخت بتن متخلخل با نفوذپذیری زیاد سازگار با محیط زیست برای استفاده در رویه‌های بتنی به عنوان جایگزین مناسب برای رویه‌های آسفالتی و بررسی تأثیر جایگزینی سرباره آلومینیوم بازیافتی با درصدی از وزن سیمان بر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، درصد جذب آب، نفوذپذیری و میزان تخلخل می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

سیمان به کار رفته در این پژوهش آزمایشگاهی از نوع سیمان تیپ II کارخانه سیمان هرمزگان است. خصوصیات سیمان انتخابی طبق استاندارد ASTM C150/C150M می‌باشد [۱۸]. این تیپ سیمان زمانی که احتمال نفوذ آرام سولفات وجود دارد، به کار برده می‌شود. سیمان تیپ II در مقایسه با سیمان تیپ I دارای گرمایی کمتری می‌باشد. نتایج آنالیز شیمیایی سیمان تیپ II هرمزگان در جدول ۱ ارائه شده است [۱۹].

۲-۱-۲- سنگدانه‌ها

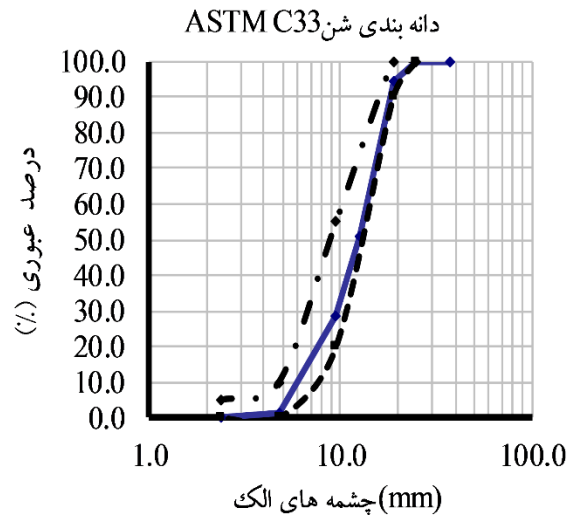
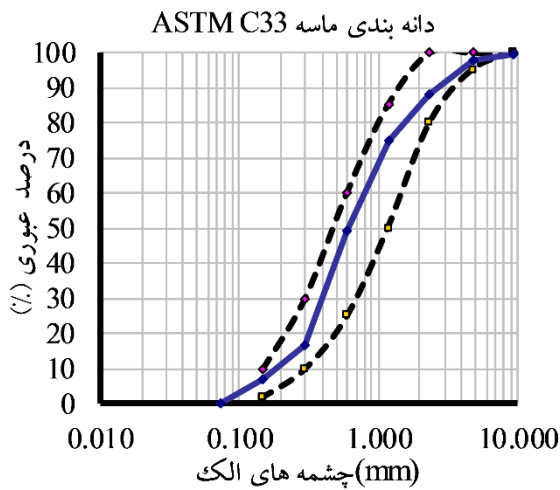
نقش مصالح سنگی در بتن را نمی‌توان تنها به عنوان پرکننده‌ها دانست. بلکه استخوان بندی اصلی بتن را تشکیل می‌دهند. بسیاری از ویژگی های اساسی بتن مانند خواص مکانیکی و دوام بتن سخت شده و همچنین کارایی بتن تازه به بافت سطحی، شکل، حداکثر اندازه، دانه بندی سنگدانه‌ها و دیگر مشخصات مصالح سنگی وابسته است.

جدول ۳- دانه بندی درشت دانه (شن) ASTM C33

چشمه الک (mm)	درصد مجاز عبوری مطابق با ASTM C33		درصد عبوری (%)
	حد بالا %	حد پایین %	
۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۱۰۰	۹۰	۹۵/۵
۹/۵	۵۵	۲۰	۴۰
۴/۸	۱۰	۰	۱
۲/۴	۵	۰	۰/۱

جدول ۴- دانه بندی ریزدانه (ماسه) ASTM C33

چشمه الک (mm)	درصد مجاز عبوری مطابق با ASTM C33		درصد عبوری %
	حد بالا %	حد پایین %	
۹/۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۴/۷۵	۱۰۰	۹۵	۹۷/۵
۲/۳۶	۱۰۰	۸۰	۸۸/۲
۱/۱۸	۸۵	۵۰	۷۵/۱
۰/۶	۶۰	۲۵	۴۹/۱
۰/۳	۳۰	۵	۱۶/۶
۰/۱۵	۱۰	۰	۶/۸



شکل ۱- منحنی دانه بندی درشت دانه (شن) بر اساس ASTM C33 شکل ۲- منحنی دانه بندی ریزدانه بر اساس ASTM C33

۲-۱-۴- فوق روان کننده

در این مطالعه با توجه به درصد جذب آب بالای سرباره آلومینیوم، برای حفظ کارایی بتن از فوق روان کننده شرکت TISS مدل R342 که مشخصات آن در جدول ۵ درج گردیده، مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۱-۳- آب مصرفی

آب استفاده شده برای ساخت بتن، آب شرب شهر بندرعباس بوده که از کیفیت مناسبی به جهت ساخت بتن برخوردار است.

جدول ۵- مشخصات فوق روان کننده شرکت TISS مدل R342

حالت فیزیکی	رنگ	وزن مخصوص	میزان نیترات	نقطه اشتعال	نقطه انجماد	PH
مایع	قهوه‌ای	۱/۱ کیلوگرم بر لیتر- در دمای ۲۰	ندارد	ندارد	صفر درجه سانتیگراد	۷

جایگزینی سرباره آلومینیوم با درصدی از وزن سیمان، آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب آب و نفوذ پذیری، به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM BS 1881-5:1970، ASTM C78/C78M، ASTM C642-13 و BS EN 12390-8 بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه انجام گرفت. همچنین برای اندازه‌گیری تخلخل نمونه‌های آزمایشی از روش اختلاف وزن نمونه خشک و وزن غوطه وری طبق رابطه ۱ استفاده گردید [۲۳-۲۷].

$$P = \left(1 - \left(\frac{W_2 - W_1}{VOL \times PW} \right) \right) \times 100\% \quad (1)$$

در رابطه (۱)، P ، W_1 ، W_2 ، VOL و PW به ترتیب تخلخل کل (%،) وزن نمونه در آب (Kg)، وزن نمونه خشک شده (Kg)، حجم نمونه (Cm^3) و چگالی آب در دمای ۲۱ درجه سانتیگراد (Kg/Cm^3) هستند.

۳- تحلیل و ارزیابی نتایج

۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

با توجه نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها که در شکل ۴ ارائه شده است. با جایگزینی ۵ درصد سرباره آلومینیوم با سیمان، مقاومت فشاری به میزان ۱ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا می‌کند. اما با جایگزینی سرباره آلومینیوم بیشتر از این میزان در بتن، باعث افزایش تولید گازهای چون H_2 ، H_2S ، CH_4 ، NH_3 و PH_3 می‌شود. گاز ایجاد شده در بتن، موجب تخلخل بیشتر بتن می‌گردد که نتیجه آن کاهش مقاومت فشاری بتن می‌باشد. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درصد از وزن سیمان بترتیب موجب کاهش ۱۳، ۱۹ و ۳۳ درصد مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده است.

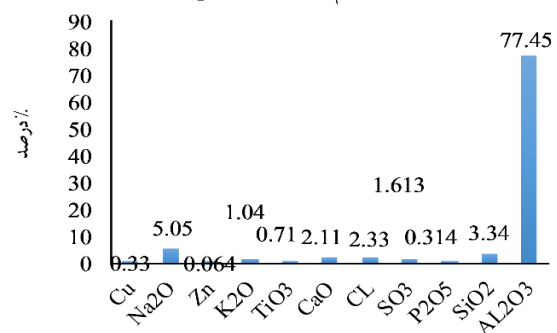
۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها (شکل ۵) مشاهده می‌شود که با جایگزینی ۵ درصد سرباره آلومینیوم با

۲-۱-۵- سرباره آلومینیوم

در این تحقیق برای ساخت رویه بتنی متخلخل از سرباره کارخانه آلومینیوم المهدی بندرعباس که آنالیز شیمیایی آن در شکل ۳ ارائه شده است، استفاده گردید.

آنالیز شیمیایی سرباره کارخانه آلومینیوم المهدی بندرعباس



ترکیبات شیمیایی

شکل ۳- آنالیز شیمیایی سرباره کارخانه آلومینیوم المهدی

بندرعباس شکل

۲-۲- نسبت‌های اختلاط

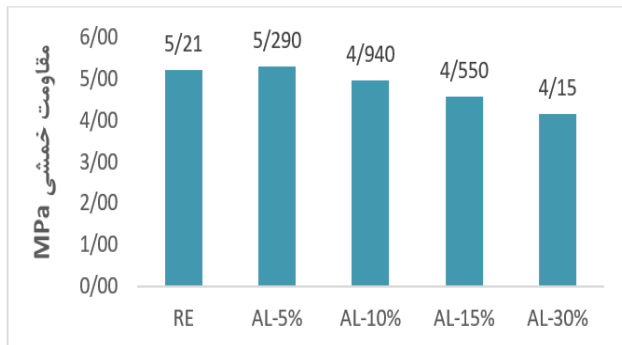
در این مطالعه با توجه به اهمیت نسبت آب به مصالح سیمانی، در گام اول با انجام آزمایش‌های تجربی و سعی و خطا میزان نسبت بهینه آب به مصالح سیمانی به میزان ۰/۴۲ بدست آمد. سپس با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های درصد جذب آب، درصد رطوبت و تعیین وزن مخصوص مصالح سنگی با اعمال درصد انحراف رطوبت از حالت SSD، نسبت اختلاط مصالح مطابق با جدول ۶ در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به درصد جذب آب بسیار بالای سرباره آلومینیوم نسبت به سیمان، با افزایش میزان فوق روان کننده، اسلامپ طرح اختلاط‌ها در حدود ۶۰ میلیمتر ثابت نگه‌داشته شد. ابعاد و کاربرد نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایشات در جدول ۷ ارائه شده است.

۳-۲- روش آزمایش‌ها

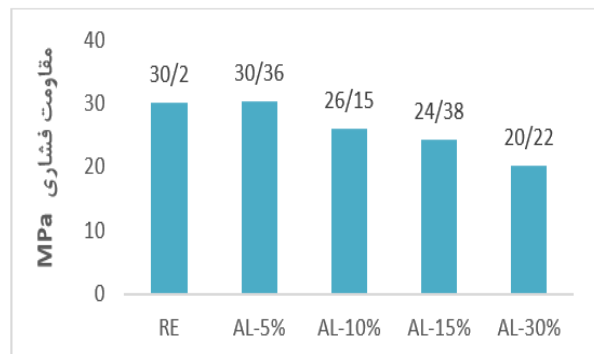
در این مطالعه برای بررسی خواص بتن متخلخل حاصله از

کاهش می یابد. نتایج ارائه شده نشان میدهد که جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درصد از وزن سیمان به ترتیب موجب کاهش ۵، ۱۲ و ۲۰ درصد مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد شده است.

سیمان، مقاومت خمشی به میزان ۲ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا می کند. اما با افزایش درصد جایگزینی سرباره آلومینیوم با سیمان به میزان بیش از ۵ درصد، مقاومت خمشی با توجه به افزایش تخلخل،



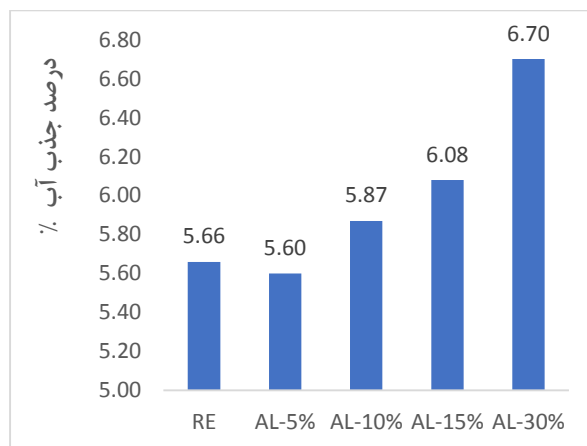
شکل ۵- نمودار نتایج مقاومت خمشی



شکل ۴- نمودار نتایج مقاومت فشاری

که با جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۵ درصد وزنی سیمان، میزان آب جذب شده توسط نمونه ها نسبت به نمونه شاهد، ۱ درصد کاهش یافته است. اما با جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درصد وزن سیمان و افزایش تخلخل، درصد جذب آب نمونه ها به ترتیب به میزان ۳، ۷ و ۱۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می یابد.

۳-۳- نتایج آزمایش درصد جذب آب
جذب آب یکی از مشخصات بتن محسوب می شود که یکی از عوامل تعیین کننده رده پایایی بتن شناخته شده و به خصوصیات ریزساختار بتن از لحاظ خلل و فرج و پیوستگی آنها با هم بستگی دارد. نتایج آزمایش درصد جذب آب بر روی نمونه ها (شکل ۶) نشان می دهد



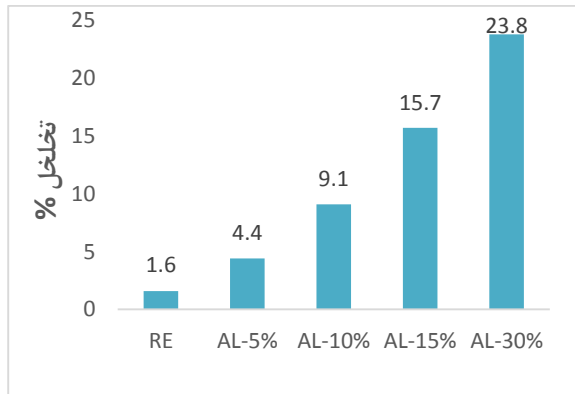
شکل ۶- نمودار نتایج آزمایش درصد جذب آب

جدول ۶- طرح های اختلاط

فوق روانکننده (kg/m ³)	سرباره آلومینیوم (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	نسبت w/c	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	
۴	-	۱۰۳۸	۷۳۴	۰/۴۲	۴۰۰	۱۸۴	شاهد
۴/۲۰	۲۰	۱۰۳۸	۷۳۴	۰/۴۲	۳۸۰	۱۸۴	AL-%5
۴/۴۰	۴۰	۱۰۳۸	۷۳۴	۰/۴۲	۳۶۰	۱۸۴	AL-%10
۴/۶۰	۶۰	۱۰۳۸	۷۳۴	۰/۴۲	۳۴۰	۱۸۴	AL-%15
۵/۲۰	۱۲۰	۱۰۳۸	۷۳۴	۰/۴۲	۲۸۰	۱۸۴	AL-%30

جدول ۷- نمونه‌ها و کاربرد آنها

کاربرد	واحد CM	طول	عرض	ارتفاع قطر
آزمایش درصد جذب آب	نمونه مکعبی	۱۰	۱۰	۱۰
آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش نفوذپذیری	نمونه مکعبی	۱۵	۱۵	۱۵
آزمایش مقاومت خمشی، میزان تخلخل	تیر بتنی	۵۰	۱۰	۱۰



شکل ۸- نمودار نتایج آزمایش تخلخل

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با بهره‌گیری از خاصیت سرباره آلومینیوم، که در فرایند تماس با آب باعث تولید گاز و در نتیجه ایجاد تخلخل در بتن می‌گردد، میتوان به ساخت رویه‌های متخلخل قابل اجرا دست یافت. بر خلاف روش‌های معمول ساخت رویه بتنی متخلخل که در طرح اختلاط آنها تنها از مصالح سنگی درشت‌دانه با یک قطر یکسان استفاده می‌شود، در مطالعه حاضر از سنگ‌دانه‌های ریز و درشت (دانه بندی کامل) استفاده می‌گردد. پس از انجام آزمایش‌ها و تفسیر نتایج بدست آمده از انجام بررسی خصوصیات بتن متخلخل حاصل از جایگزینی سرباره آلومینیوم با درصدی از وزن سیمان، می‌توان چنین نتیجه گرفت که استفاده از سرباره آلومینیوم دارای دستاوردهای زیر می‌باشد:

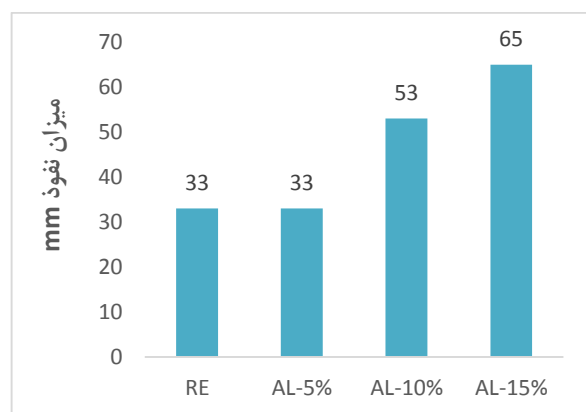
- مدیریت و حل مشکل بازیافت پسماندهای صنعت آلومینیوم سازی
- کاهش مصرف سیمان که مزایایی چون صرفه‌جویی اقتصادی، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیط زیست را به همراه دارد.
- ارائه روش جدید برای ساخت بتن متخلخل با نفوذپذیری زیاد که برخلاف روش معمول که تنها با استفاده از یک یا ترکیبی از دو اندازه مختلف سنگ‌دانه درشت، خاصیت تخلخل

۳-۴- نتایج آزمایش نفوذپذیری

مهم‌ترین ویژگی بتن متخلخل نفوذپذیری آن می‌باشد. نتایج حاصل از انجام آزمایش نفوذپذیری در قالب شکل ۷ ارائه شده است. نتایج نشان دادند با جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۵ درصد وزن سیمان، تغییری در میزان نفوذپذیری نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد ایجاد نمی‌شود. اما با جایگزینی سرباره با ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان، سیر صعودی قابل توجهی در میزان نفوذپذیری نمونه‌ها مشاهده می‌شود و نفوذپذیری به ترتیب به میزان ۶۱ و ۹۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. همچنین در طی انجام آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه حاصل از جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۳۰ درصد از وزن سیمان، مشاهده می‌شود که با توجه به تخلخل بسیار زیاد این نمونه‌ها، آب بلافاصله و به سرعت از آنها عبور می‌نماید.

۳-۵- تخلخل

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش تخلخل نمونه‌ها که در شکل ۸ نمایش داده شده است، با افزایش جایگزینی سرباره آلومینیوم با سیمان، بدلیل تولید گاز بیشتر در مخلوط بتن، حباب‌های گاز و حفرات ریز بیشتری در بتن ایجاد می‌شود. لذا درصد تخلخل بتن حاصله، افزایش چشمگیری خواهد داشت.



شکل ۷- نمودار نتایج آزمایش نفوذپذیری

[6] Ewais E.M.M., Khalil N.M., Amin M.S, Ahmed Y.M.Z., Barakat M.A., "Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement", *Ceramics International*, 2009, 35(8), 3381–3388 .

[7] Wilson S., "Residues from aluminum dross recycling in cement", 2007.

[8] Bilal H., Chen T., Ren M., Gao X., Su A., "Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete", *Construction and Building Materials*, 2021, 275, 122124 .

[9] Tennis P.D., Leming M.L., Akers D.J., "Pervious concrete pavements" *Portland Cement Association Skokie, IL*, 2004 .

[10] Deo, O., Neithalath, N. "Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features". *Mater. Sci. Eng*, 2010 528, 402–412.

[11] de Moura J.M.B.M., Pinheiro I.G., Aguado A., Rohden A.B., "Sustainable pervious concrete containing glass powder waste: Performance and modeling", *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316, 128213 .

[12] Valerie López-Carrasquillo, Sangchul Hwang., "Comparative assessment of pervious concrete mixtures containing fly ash and nanomaterials for compressive strength, physical durability, permeability, water quality performance and production cost", *Construction and Building Materials*, 2017, 148–158

[13] Anush K. Chandrappa, Krishna Prapoorna Biligiri., " Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach", *Construction and Building Materials*, 2016, 627–637.

[14] Ahmed Ibrahim, Enad Mahmoud, Mohammed Yamin, Varun Chowdary Patibandla., " Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties", *Construction and Building Materials*, 2014, 524–529.

[15] Anthony Torres, Cristián Gaedicke, Jiong Hu, Rupesh Bejugam, Sarah McMasters., " Comparing Design Void Content with Actual Void Content of Laboratory Prepared Pervious Concrete", *Materials Sciences and Applications*, 2018

[16] Lo F-C, Lee M-G, Lo S-L., "Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary Portland cement on pervious concrete", *Construction and Building Materials*, 2021, 286, 122947.

[17] Hassan Tajik Ghashghaei, Abolfazl Hassani., "

همراه با نفوذپذیری را در بتن ایجاد می نمایند. در این روش نوین از سنگ دانه های ریز و درشت دانه به صورت هم زمان و دانه بندی مطابق با استاندارد ASTM C33 استفاده و جهت ایجاد تخلخل در بتن از جایگزینی سرباره آلومینیوم با درصدی از سیمان استفاده می گردد.

• با مقایسه مشخصات مکانیکی، درصد تخلخل و نفوذپذیری بتن متخلخل با نفوذپذیری زیاد تولید شده از طریق روش جدید ارائه شده در این تحقیق با مشخصات نمونه های بتن متخلخل بدست آمده در مطالعات پیشین مشاهده میگردد، بتن حاصله از جایگزینی سرباره آلومینیوم با ۳۰ درصد از وزن سیمان با دارا بودن مقاومت فشاری و خمشی بترتیب به میزان ۴، ۲۰ مگاپاسکال و درصد تخلخل به میزان ۲۴ درصد و همچنین عبور سریع و بلافاصله آب از خود علاوه بر دارا بودن مشخصه های نفوذپذیری و تخلخل مناسب، به لحاظ تحمل بارهای وارده، دارای مشخصات مکانیکی مناسب نیز می باشد

۵- مراجع

[1] Silveira N.C.G., Martins M.L.F., Bezerra A., Araújo F.G.S., "Red Mud from the Aluminum Industry: Production, Characteristics, and Alternative Applications in Construction Materials—A Review. Sustainability", 2021, 13(22), 12741 .

[2] Phiri T.C., Singh P., Nikoloski A.N., "The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review—Part II", *Minerals Engineering*, 2021, 172, 107150 .

[3] Kambole C., Paige-Green P., Kupolati W.K., Ndambuki J.M., Adeboje A., "Comparison of technical and short-term environmental characteristics of weathered and fresh blast furnace slag aggregates for road base applications in South Africa", *Case Studies in Construction Materials*, 2019, 11, e00239 .

[4] Muzayyanah N., Maziya F.B., Yuriandala Y., "The Influence of Aluminum Slag Ash for Paving Block Production", 6th International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2021, 12014 .

[5] Elinwa A.U., Mbadike E., "The use of aluminum waste for concrete production" *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2011, 10(1), 217–220 .

Investigating the Relationship between Porosity and Permeability Coefficient for Pervious Concrete Pavement by Statistical Modelling", Materials Sciences and Applications, 2016

[18] ASTM international-C150/C150M-19a, "Standard specification for portland cement", ASTM International West Conshohocken, PA, 2015.

[19] Hormozgan cement company. <https://hormozgancement.com/>.

[20] ASTM International - ASTM C127-88 "Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate", ASTM International West Conshohocken, PA, 2001.

[21] ASTM International - ASTM C55, "Standard specification for concrete building brick", ASTM International West Conshohocken, PA, 2008.

[22] ASTM International - ASTM C33, "Standard specifications for concrete aggregates", ASTM International West Conshohocken, PA, 2001.

[23] BSI. BS 1881-5: 1970, "Testing concrete. Methods of testing hardened concrete for other than strength", BSI London, UK, 1970 .

[24] ASTM International - ASTM C78/C78M-21, "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)", 2021.

[25] ASTM International - ASTM C642-13 A., "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete". West Conshohocken, PA ASTM Int. 2013.

[26] EN BS. 12390-8, "Depth of penetration of water under pressure", British Standard Institute, 2000 .

[27] ASTM International - ASTM C1754/C1754M, "Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete". 2012.

Study on the mechanical properties of porous concrete with high permeability using aluminum slag

Kianmehr Hashemipour

M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

Mohammad Reza Mohammadizadeh *

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

Abstract

Principal recycling and reuse of industrial waste is one of the most important human challenges to protect the environment. In recent years, due to the unique properties of pervious concrete, the use of pervious concrete pavement as a good alternative to asphalt procedures has been considered. In this study, in order to assess a new method for the manufacture of high - environmentally friendly concrete pavements with aluminum slag replacement with 0, 5, 10, 15 and 30 % cement weight, the concrete samples were made and the tests including compressive strength, bending strength, water absorption percentage, permeability and porosity done. The results showed that aluminum slag replacement with 5 % of cement weight, compressive strength, bending resistance and water absorption percentage compared to the control sample did not change significantly. But using the replacement of aluminum slag with 10, 15 and 30 percent of the cement weight, compressive strength and bending strength comparing to the control sample were decreased by 16, 24 and 50% and by 6, 15 and 24 %, respectively. By replacing aluminum slag with 10 and 15% by weight of cement, the permeability comparing to the control sample was increased by 61 and 97%, respectively. It was also observed that due to the high porosity of the samples containing aluminum slag replacement with 30 % of the weight of the cement, water passed immediately and quickly.

Keywords: Aluminum slag, pervious concrete, Industrial waste, Permeability, Mechanical properties.

* Corresponding Author: mrz_mohammadizadeh@hormozgan.ac.ir

