

## بررسی آزمایشگاهی استفاده از بتن بازیافت شده در لایه زیراساس روسازی‌های راه

وحید آیین<sup>۱</sup>، سیدمسعود نصرآزادانی<sup>۲</sup>، علیرضا خاوندی خیایوی<sup>۳</sup>، محمدحسین امین‌فر<sup>۴\*</sup> و جواد علیزاده صومعه<sup>۵</sup>  
<sup>۱</sup> استادیار مدعو دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز  
<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران  
<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان  
<sup>۴</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز  
<sup>۵</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اهر

### چکیده

پسماندها که از بدو پیدایش تمدن بشری همواره با انسان‌ها بوده‌اند، محدوده وسیعی از مواد را در بر می‌گیرند. در سراسر جهان، امروزه حجم وسیعی از مصالح سنگ‌دانه‌ای برای ساخت و ساز از منابع طبیعی کوهی و رودخانه‌ای تهیه می‌شوند. استخراج مصالح طبیعی تأثیرات زیست محیطی مخرب داشته و استفاده از آن‌ها باعث مصرف منابع طبیعی محدود می‌گردد. نتایج به دست آمده در این تحقیق برای حدود اتربرگ، ارزش ماسه‌ای، سایش لوس آنجلس، CBR و آزمایش ساندنس ترکیبات مختلف مصالح طبیعی و بتن بازیافتی حاکی از این است که به غیر از آزمایش ساندنس با سولفات سدیم بقیه نتایج در بازه‌های خواسته شده است. طبق مطالعات انجام شده، جهت آزمایش ساندنس باید سولفات منیزیم جایگزین سولفات سدیم گردد. بنابر این استفاده از بتن بازیافتی به تنهایی و همچنین ترکیبات آن با مصالح طبیعی از نظر انطباق با مشخصات فنی جهت استفاده در زیراساس راه‌ها بلامانع است. ملاحظه می‌گردد که بازیافت نخاله‌های بتنی می‌تواند علاوه بر مزایای اقتصادی باعث کاهش مصرف انرژی، کاهش تولید CO<sub>2</sub> و ایجاد صنعت سبز در بخش ساخت و ساز شود.

**واژگان کلیدی:** بتن بازیافت شده، لایه زیراساس، روسازی، پسماند ساختمانی.

### ۱- مقدمه

کلیه تصمیمات اتخاذ شده مستنداتی توسط دارنده و آژانس ثبت و ضبط گردند [۱].

سنگ‌دانه بتن بازیافتی<sup>۲</sup> به سنگ‌دانه‌ای اطلاق می‌شود که از فرآوری مصالح غیر آلی به دست می‌آید که قبلاً در ساخت و ساز استفاده شده است و در اصل از بتن خرد شده تشکیل شده است. موارد کاربرد RCA عبارتند از: مصالح چسبنده آسفالتی، بتن، بسترسازی لوله‌گذاری، مخلوط‌های چسبنده اساس و زیراساس، مخلوط‌های غیر چسبنده برای اساس زیراساس، مصالح منتخب، خاکریزی و پرکننده [۲-۵].

عملیات ساخت و ساز و تخریب<sup>۳</sup> که در صنعت بازیافت به C&D Work مشهور است، حجم وسیعی از نخاله‌های ساختمانی حاصل از پسماندهای جامد را تولید می‌کنند. نسبت پسماندهای جامد حاصل از ساخت و ساز در کشورهای مختلف در جدول (۱) مقایسه شده است [۶-۱۰].

Chen و Brown [۱۱] معتقدند که استفاده از RCA به عنوان اساس جاده، هزینه‌های ساخت و ساز جاده‌ای را کاهش

پسماند در Waste Framework Directive به هر ماده یا شی‌ای که دارنده آن را دور می‌اندازد یا تمایل به دور انداختن دارد یا لازم است دور انداخته شود، اطلاق می‌شود. بیشتر مصالح ثانویه و بازیافتی که مطابق آیین‌نامه برای مخلوط‌های زیراساس غیر چسبنده مناسب هستند، عبارتند از: مصالح بازیافتی و مصالح ثانویه. مصالح بازیافتی خود شامل موارد زیر می‌باشند: سنگ-دانه‌های بازیافتی، سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی، آسفالت بازیافتی و شیشه بازیافتی. مصالح ثانویه نیز موارد زیر را در بر می‌گیرد: ماسه و رس چینی، ضایعات کان ذغال سنگ سوخته، ماسه ریخته‌گری، خاکستر کوره، خرده سنگ‌های معادن، پسماندهای پالایشگاهی، سرباره فسفری و سرباره فولاد [۱].

پروتکل کیفیت "برنامه عملیاتی پسماند و منابع"<sup>۱</sup> حمایت‌هایی را جهت تصمیم‌گیری در مورد پسماند بودن یا نبودن مشخص کرده است. یعنی اگر همه معیارهای مشخص شده در این پروتکل لحاظ شوند، آن ماده دیگر پسماند محسوب نمی‌گردد. البته اگر ماده یا شیء به عنوان پسماند در نظر گرفته شد، باید از

2- Recycled concrete aggregate (RCA)

3- Construction and demolition work

1- The waste and resources action programme (WRAP)

نموده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از این مصالح در راه‌ها کاملاً امکان‌پذیر بوده و مزایای گسترش استفاده از این مصالح فراتر از جنبه‌های زیست محیطی می‌باشد. برخی محققان به بررسی‌های آزمایشگاهی بیشتری در رابطه با مواد بازیافتی پرداخته‌اند و چندین تحقیق بر اساس کاربردهای واقعی مصالح بازیافتی حاصل از C&D Work در جاده‌ها وجود دارد [۱۳].

یکی از برنامه‌های اصلی در مورد سنگ‌دانه‌های بازیافتی، جایگزینی آن‌ها با سنگ‌دانه‌های طبیعی به عنوان مصالح زیرساز در لایه‌های غیر چسبنده می‌باشد. بدین منظور اکثراً از سنگ‌دانه‌های بتنی بازیافت شده استفاده می‌شود. با این حال در منطقه مدیترانه مقدار زیادی سنگ‌دانه بازیافتی (بتنی و بنایی) تولید شده و بررسی امکان استفاده از این نوع مصالح که دارای ترکیبات متفاوتی هستند، به صرف برنامه‌های کاربردی می‌باشد. جهت بررسی رابطه بین ترکیبات مختلف مصالح بازیافت شده و رفتار مکانیکی آن‌ها برای استفاده در جاده‌ها، ۳۱ نوع مصالح مورد مطالعه قرار گرفته است (چهار نوع مصالح طبیعی و ۲۷ نوع مصالح بازیافتی که از ۱۱ محل مختلف تصفیه مواد بازیافت تهیه شده بودند). در همه نمونه‌ها آزمایشات ویژگی‌ها و تست‌های رفتار مکانیکی (ضریب لس‌آنجلس، پرکتور اصلاح شده و CBR) انجام گردید. نتایج به دست آمده با استفاده از استاندارد آزمون‌های آماری ANOVA و تجزیه و تحلیل همبستگی ساده و چندگانه خطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند [۱۴].

نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی سنگ‌دانه‌های بازیافتی تولید شده از مخلوط نخاله‌ها برای استفاده در لایه‌های غیر چسبنده راه‌ها نشان می‌دهند که وجود مصالح بتن و سرامیک در مخلوط، موجب واکنش پوزولانی شده و منجر به افزایش ظرفیت باربری مخلوط بازیافتی متراکم شده می‌شود. با تجزیه و تحلیل ویژگی‌های شیمیایی، می‌توان استنباط کرد که کل سولفات موجود در ترکیب، مقدار گچ و نمک‌های محلول را می‌توان با آزمایش سولفات محلول در آب و رابطه‌ای که بین پارامترها وجود دارد تنظیم کرد. به طور کلی، مخلوط سنگ‌دانه‌های بازیافت شده حاوی مواد سرامیکی زیر ۳۵٪، مقدار مواد آلی کمتر از ۸۰٪ و سولفات محلول در آب کمتر از ۰/۴٪، به لحاظ فنی برای استفاده در بخش‌های غیر چسبنده راه امکان‌پذیر است [۱۵].

در ایران سالیانه حجم وسیعی از مصالح با ارزش به عنوان نخاله فقط دفع شده و صرفاً جهت پر کردن دره‌ها و ایجاد دپوهای وسیع به کار می‌رود که هیچ نتیجه‌ای غیر از تخریب و آلودگی محیط زیست و تحمیل هزینه‌های بسیار گزاف بر طرح‌های

می‌دهد، حال آن که منابع سنگ‌دانه به صورت دست نخورده باقی می‌مانند.

جدول ۱- مقایسه نسبت‌های پسماندهای جامد حاصل از ساخت و ساز در کشورهای مختلف [۶-۱۰]

کشور	نسبت زباله‌های ساخت و ساز به کل زباله‌ها (%)	C&D زباله‌های بازیافتی (%)
استرالیا	۴۴	۵۱
برزیل	۱۵	۸
دانمارک	۲۵-۵۰	۸۰
فنلاند	۱۴	۴۰
فرانسه	۲۵	۲۰-۳۰
آلمان	۱۹	۴۰ تا ۶۰
هنگ کنگ	۳۸	بدون اطلاعات
ژاپن	۳۶	۶۵
ایتالیا	۳۰	۱۰
هلند	۲۶	۷۵
نروژ	۳۰	۷
اسپانیا	۷۰	۱۷
انگلستان	بالای ۵۰	۴۰
آمریکا	۲۹	۲۵

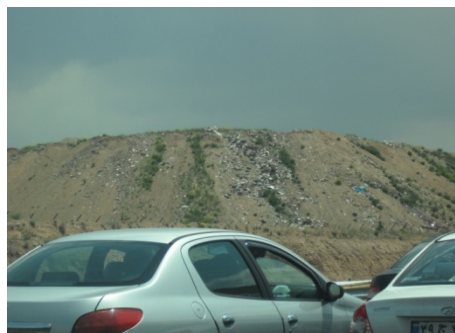
Malešev و همکاران [۱۲] یک تحلیل مقایسه‌ای در مورد نتایج تجربی خواص بتن تازه و سخت شده با نسبت‌های جایگزینی متفاوت سنگ‌دانه‌های طبیعی با سنگ‌دانه‌های درشت بازیافتی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که بدون در نظر گرفتن نسبت جایگزینی، بتن سنگ‌دانه‌های بازیافتی، کارایی رضایت بخشی دارد.

در اسپانیا، استفاده از مصالح بازیافت شده<sup>۱</sup> در ساخت و ساز زیرساز جاده و خاکریزی و بسترسازی در حال رشد است. برخی از محققان امکان استفاده از RA در برنامه‌های کاربردی با ارزش افزوده بالاتر را مورد مطالعه قرار داده‌اند؛ از جمله ساخت زیرساز با دانه‌های اصلاح نشده. با این حال، تحقیقات کمی در مورد خواص و رفتار مخلوط RA اصلاح شده با سیمان، برای استفاده در پروژه‌های واقعی به عنوان اساس برای جاده‌ها وجود دارد. بدین منظور اقداماتی در راستای تحقیق و تفحص از منابع زباله‌های ساخت و ساز و تخریب که تحت عنوان مصالح بازیافتی استفاده می‌شوند انجام گرفته و کارخانه فرآوری و تولید مصالح بازیافتی اقدام به تولید مواد بازیافتی اصلاح شده با سیمان برای استفاده در زیرساز پروژه ساخت رمپ دسترسی یک بزرگراه



شکل ۳- سنگدانه‌های طبیعی

عمرانی ندارد. شکل (۱) از بزرگراه بابایی تهران گویای این مطالب است.



شکل ۱- تصویری از دیوهای اطراف بزرگراه بابایی

با توجه به طرح‌های اختلاط مطالعات کشورهای دیگر، سه سری مصالح تحت عناوین گروه ۱، گروه ۲ و گروه ۳ در نظر گرفته شده (جدول (۲)) است.

جدول ۲- طرح‌های اختلاط

طرح اختلاط	گروه
NA ۱۰۰٪	گروه ۱ (NA)
NA ۸۰٪ + RCA ۲۰٪	گروه ۲ (NA + RCA)
NA ۵۰٪ + RCA ۵۰٪	
NA ۲۰٪ + RCA ۸۰٪	
RCA ۱۰۰٪	گروه ۳ (RCA)

مراحل کار جهت عملیات اجرایی عبارتند از:

- انتقال مصالح از تونل امیرکبیر: برآوردهای اولیه نشان داد جهت آزمایشات لازم از هر کدام از مصالح NA و RCA به مقدار دو تن مورد نیاز می‌باشد.
- خرد کردن نخاله‌های بتنی درشت‌دانه جهت قرار گرفتن در بازه II زیراساس (براساس نتایج آزمایش دانه‌بندی مصالح طبیعی که در بازه II بود) [۱۶].
- سرند نخاله‌های بتنی: نخاله‌های بتنی پس از خرد شدن سرند شدند تا توزیع دانه‌بندی لازم حاصل شود.
- تهیه مخلوط‌های NA و RCA جهت تأمین مخلوط‌های جدول (۲)
- انجام آزمایشات: انتقال مخلوط‌های به دست آمده به آزمایشگاه.

## ۲- مواد و روش‌ها

مصالح RCA از تخریب دیواره‌ها و شمع‌های پروژه تونل امیرکبیر که در مرکز تهران در حال اجراست و به دلیل تغییر مشخصات اجرایی و اصلاح نقشه‌ها پیمانکار طرح اقدام به تخریب کرده بود، تأمین گردید (شکل (۲)). مصالح طبیعی<sup>۱</sup> از معادن غرب تهران که منبع آن‌ها بستر رودخانه کن می‌باشد، تهیه شد. این مصالح مخلوط شن و ماسه رودخانه‌ای سرند شده رای زیراساس بودند که تعداد محدودی از دانه‌های درشت خارج از محدوده باقی‌مانده نیز به صورت دستی در محل آزمایشگاه جدا شدند (شکل (۳)).



شکل ۲- بتن‌های تخریبی که به دلیل تخریب با چکش برقی دارای اندازه‌های مختلف بودند

### ۳- آئین‌نامه‌ها و استانداردهای تحقیق

استانداردهای به کار رفته جهت آزمایشات این تحقیق، نشریه ۱۰۱ و ۲۳۴ معاونت برنامه‌ریزی ریاست جمهوری است [۱۶-۱۷]. فصل زیرساز آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته و کلیه آزمایشات ذکر شده در این فصل منطبق بر BS، AASHTO و

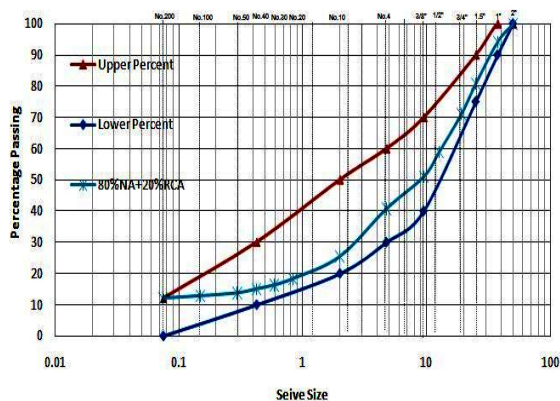
ASTM می‌باشند. از آن‌جا که این آئین‌نامه‌ها در مورد مصالح بازیافتی هیچ بندی ندارند، سعی گردیده است جهت تکمیل مطالعات از BS یا AASHTO استفاده شود. آزمایشات به کار رفته در این تحقیق مطابق جدول (۳) می‌باشند.

جدول ۳- مشخصات مصالح زیرساز [۱۶]

روش‌های آزمایش		مشخصات	شرح آزمایش
ASTM	AASHTO		
D 4318	T 90	حداکثر ۶	دامنه خمیری
D 4318	T 89	حداکثر ۲۵	حد روانی
D 2419	T 176	حداکثر ۳۰	ارزش ماسه‌ای (پس از کوبیدگی)
C 133	T 96	حداکثر ۵۰	سایش با روش لس آنجلس
D 1883	T 193	حداکثر ۳۰	سی‌بی‌آر در تراکم ۱۰۰ درصد آزمایشگاهی

### ۴- بررسی‌های آزمایشگاهی

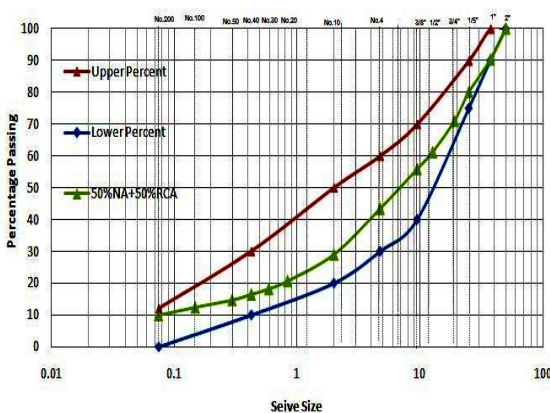
مرکز مطالعات ژئوتکنیک و مقاومت مصالح متعلق به شهرداری تهران، آزمایشگاه وزارت راه و ترابری و تعدادی آزمایشگاه‌های خصوصی جهت انجام تست‌ها در نظر گرفته شدند. بخشی از مصالح طبیعی (NA) با خرده‌های بتن بازیافتی (RCA) جایگزین گردیده و به عنوان مصالح زیرساز مطالعه گردیدند. مقدار جایگزینی ۲۰٪ تا ۵۰٪ وزنی RCA بود و بر این اساس طرح‌های اختلاط عبارت بودند از NA ۱۰۰٪ به عنوان مخلوط کنترل و بقیه مخلوط‌ها مطابق جدول (۲).



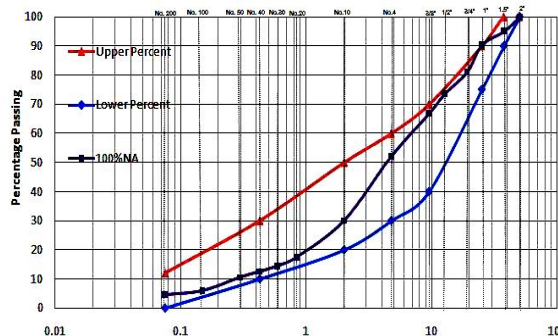
شکل ۵- منحنی دانه‌بندی ۸۰٪ NA + ۲۰٪ RCA

### ۵- آزمایشات و نتایج آن‌ها

توزیع دانه‌بندی مطابق منحنی دانه‌بندی نوع II زیرساز بود که در شکل‌های (۴) تا (۸) نشان داده شده است.



شکل ۶- منحنی دانه‌بندی ۵۰٪ NA + ۵۰٪ RCA



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی ۱۰۰٪ NA

### ۲-۵- هم‌ارز ماسه‌ای (SE)

تحت شرایط استاندارد ASTM D 2419-02-2002 سهم‌های نسبی ریزدانه‌های پلاستیکی رسی و غبار در بخش ریزدانه هر مخلوط معین رده‌ده از الک شماره ۴/۷۵ میلیمتر اندازه‌گیری شدند و مقادیر زیر به دست آمد [۲۰]:

جدول ۴- هم‌ارز ماسه‌ای

مصالح	SE (%)
RCA ۱۰۰٪	۷۶
۸۰٪ RCA+۲۰٪ NA	۷۱
۵۰٪ RCA+۵۰٪ NA	۶۹
۲۰٪ RCA+۸۰٪ NA	۶۰
۱۰۰٪ NA	۶۴

نتایج نشان دادند که مقدار ریزدانه‌های غباری شکل مضر در RCA کمتر از NA بود. همه مخلوط‌ها الزامات آئین‌نامه‌ای ایران را جواب داده و SE همه آن‌ها بیشتر از حداقل ۳۰٪ لازم بود.

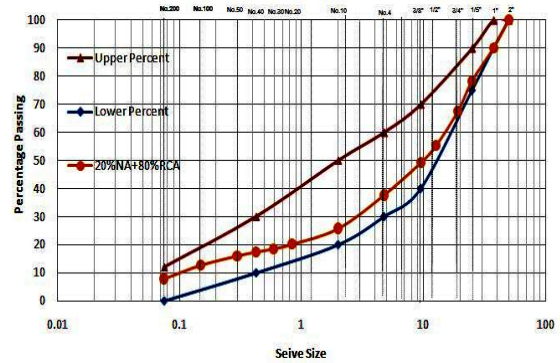
### ۳-۵- سایش لس آنجلس (LAA)

به منظور انجام این آزمایش، یک نمونه ۱۰ کیلوگرمی مطابق دانه‌بندی B در استاندارد ASTM C 131-06-2006 تهیه شد [۲۱]. نتایج آزمایشات لس آنجلس (LAA) برای هر مصالح واحد زیادی با نتایج محققین دیگر که در جدول (۵) نشان داده شده است، مطابقت دارد [۲۲-۲۳].

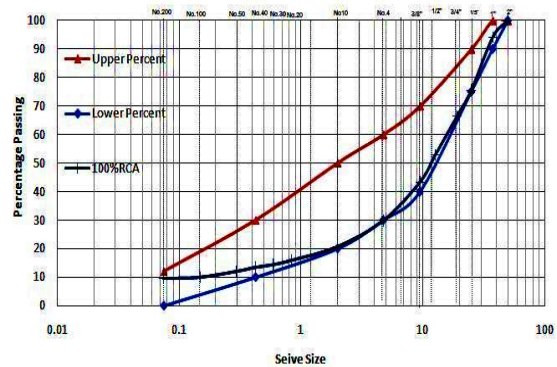
جدول ۵- نتایج سایش لس آنجلس

کاهش وزن در LAA	نوع مخلوط
۳۱٪	RCA ۱۰۰٪
۳۰٪	۸۰٪ RCA+۲۰٪ NA و ۵۰٪ RCA+۵۰٪ NA
۲۸٪	۲۰٪ RCA+۸۰٪ NA
۲۴٪	۱۰۰٪ NA

نتایج آزمایش نشان می‌دهند که هرچه سطح درصد RCA با NA افزایش می‌یابد، مقدار LAA نیز افزایش پیدا می‌کند. دانه‌های NA در مقایسه با دانه‌های RCA مقاومت بیشتری داشته و درصد ریزدانه‌ها کاهش می‌یابد. در نتیجه این نوع دانه‌بندی‌ها تحت بارهای سرویس در لایه‌های راه، مقاومت بالایی داشته و تغییر کم در دانه‌بندی باعث کاهش جذب آب و بهبود خواص زهکشی زیرساز غیر چسبنده ساخته شده از مخلوط RCA و



شکل ۷- منحنی دانه‌بندی ۲۰٪ NA+۸۰٪ RCA

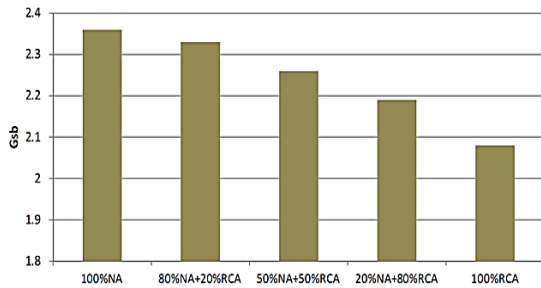


شکل ۸- منحنی دانه‌بندی ۱۰۰٪ RCA

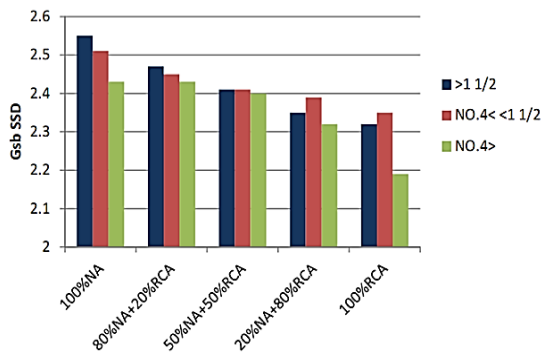
آزمایش‌های مختلفی که در این پژوهش انجام شد در زیر شرح داده شده‌اند.

### ۱-۵- حدود ات‌برگ

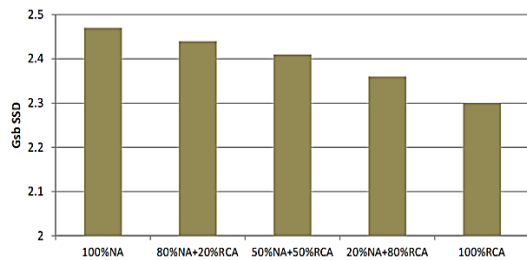
این تست شامل حد مایع (LL) و روانی (PL) کلیه مخلوط‌ها بود. حدود مایع بتن مطابق AASHTO T89-02-2007 بر روی مصالح عبوری از الک ۰/۴۲۵ میلیمتر به وسیله ابزار حد مایع انجام گردید. برای ۱۰۰٪ NA و ۱۰۰٪ RCA حد مایع در ظرف کاساگرانده با تعداد ضربات پایین‌تر به دست آمد [۱۸]. برای ۱۰۰٪ RCA فقط ۱۰ ضربه با رطوبت ۳۷ درصد و برای ۱۰۰٪ NA، ۱۶ ضربه با رطوبت ۱۷ درصد قابل اجرا بود. برای مخلوط‌های دیگر، حضور RCA باعث جذب آهسته آب توسط نمونه‌های آزمایشگاهی شد. برای تعیین حد روانی مطابق AASHTO T90-00 (۲۰۰۴) نمونه در مراحل اولیه رز دادن خرد شد. بدین معنی که برای NA و RCA، حد روانی قابل تعیین نبود [۱۹]. بدین ترتیب نتیجه می‌گردد که برای NA و RCA و مخلوط‌های آن، حد پلاستیک قابل تعیین نبود و می‌توانند غیر پلاستیک (NP) گزارش شوند.



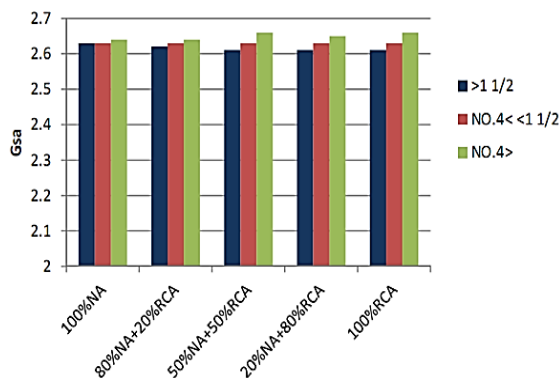
شکل ۱۰- مقدار متوسط  $G_{sb}$  برای کل مخلوط NA و RCA



شکل ۱۱- وزن مخصوص توده ( $G_{sb}SDD$ ) برای NA و RCA



شکل ۱۲-  $G_{sb}SDD$  برای مخلوط‌های NA و RCA



شکل ۱۳- وزن مخصوص ظاهری برای مخلوط‌های NA و RCA

NA می‌شود. همچنین تغییر دانه‌بندی NA به مراتب کمتر از RCA می‌باشد (مطابق با شکل‌های (۱۶) و (۱۷) که در بخش (۴-۵) ذکر خواهد شد).

#### ۴-۵- جذب آب

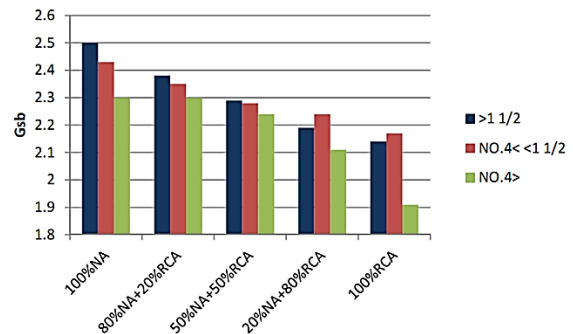
تعیین وزن مخصوص و جذب آب بخش ریزدانه، مطابق روش تشریح شده AASHTO T84 انجام گرفت [۲۴]. طبق این استاندارد، درصد عبوری نمونه‌های ریزدانه، از مصالح عبوری از الک نمره ۴ انتخاب و شرایط اشباع و خشک (SSD) با استفاده از روش آزمایش مخروط به دست آمد. تعیین وزن مخصوص شامل وزن مخصوص توده ( $G_{sb}$ ) جهت تعیین وزن واحد حجم با محاسبه وزن اشغال شده توسط سنگدانه‌های مخلوط با در نظر گرفتن فضاهای قابل نفوذ و غیر قابل نفوذ ذرات (غیر از فضای خالی بین ذرات)، وزن مخصوص توده خشک و اشباع ( $G_{sb} SSD$ ) جهت تعیین وزن واحد حجم هوا در نمونه‌ها که با فراهم ساختن الزامات جذب آب مطابقت داشت و وزن مخصوص ظاهری ( $G_{sa}$ ) که به عنوان دانسیته نسبی سنگدانه‌ها بدون در نظر گرفتن فضای قابل نفوذ مد نظر قرار گرفت.

نتایج آزمایشات انجام شده بر روی سه بازه:

الف) درصد عبوری بزرگ‌تر از ۳۷/۵ میلیمتر،

ب) درصد عبوری بزرگ‌تر از ۴/۷۵ میلیمتر و ریزتر از ۳۷/۵ میلیمتر و

ج) درصد عبوری ریزتر از ۳۷/۵ میلیمتر برای مخلوط‌های RCA و NA، در شکل‌های (۹) تا (۱۴) خلاصه شده است.

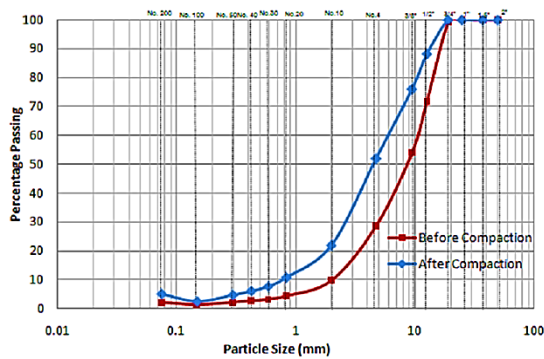


شکل ۹- وزن مخصوص توده ( $G_{sb}$ ) برای مخلوط‌های NA و RCA

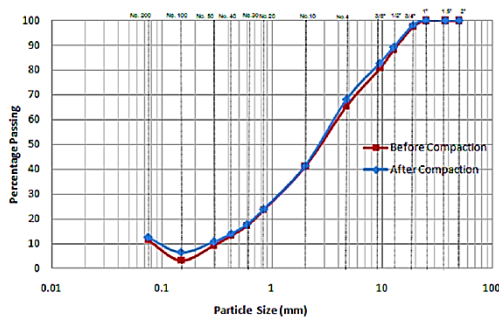


نتایج نشان می‌دهند که افزایش مقدار RCA در مخلوط‌های RCA+NA باعث افزایش مقدار رطوبت بهینه مصالح می‌شود. این به دلیل نقش سیمان هیدراته نشده در دانه‌بندی RCA است. همچنین حضور RCA در مخلوط‌ها باعث کاهش MDD می‌شود.

به منظور شبیه‌سازی خرد شدن سنگ‌دانه‌ها و تغییرات ابعاد آن‌ها زیر عبور غلتک در روسازی واقعی، دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ۳/۴ اینچ انجام شد. همان‌طور که دانه‌بندی RCA و NA قبل و بعد آزمایش به ترتیب در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که تغییر دانه‌بندی قابل ملاحظه‌ای در بخش درشت‌دانه مصالح RCA وجود دارد. در حالی که برای مصالح NA تغییر دانه‌بندی به دلیل تراکم بسیار کم اهمیت بود.



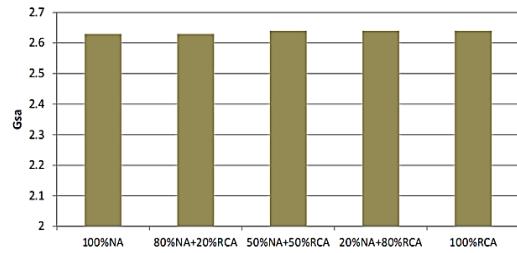
شکل ۱۶- توزیع دانه‌بندی نمونه متراکم شده RCA



شکل ۱۷- توزیع دانه‌بندی نمونه متراکم شده NA

#### ۵-۶- آزمایش حد باربری کالیفرنیا (CBR)

آزمایش CBR بر روی کلیه مخلوط‌ها در رطوبت بهینه آن‌ها مطابق با AASHTO Designation T193-99-2003 انجام شد [۲۶]. سه نمونه از هر مخلوط با سه ضربه متفاوت ۱۰، ۳۰ و ۶۵ بر هر لایه از کل پنج لایه کوبیده شد. شکل‌های (۱۸) تا (۲۲) مقادیر CBR را به ازای دانسیته متناظر آن‌ها برای هر مخلوط در سه انرژی تراکم نشان می‌دهند.

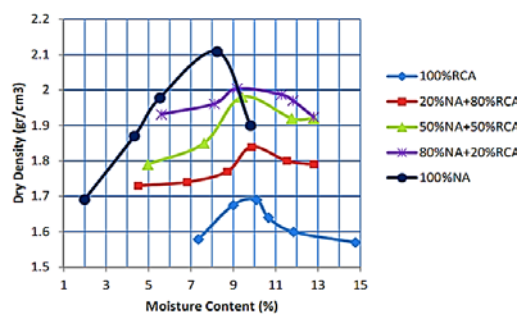


شکل ۱۴- مقدار میانگین  $G_{sa}$  برای مخلوط‌های NA و RCA

نتایج آزمایشات نشان دادند که NA ۱۰۰٪، بیشترین  $G_{sb}$  و  $G_{sa}$  SSD برای همه درصد‌های عبوری داراست. این بجز  $G_{sa}$  ریزدانه‌های کمتر از ۴/۷۵ میلیمتری مخلوط‌های RCA ۱۰۰٪، ۵۰٪RCA+۵۰٪NA و ۲۰٪RCA+۸۰٪NA صحیح است. این بدان دلیل است که  $G_{sa}$  این مصالح تحت تأثیر ذرات ریز سیمان در واحد حجم مخلوط است که بر مقدار متوسط  $G_{sa}$  نیز اثر خواهد داشت.

#### ۵-۵- آزمایش تراکم

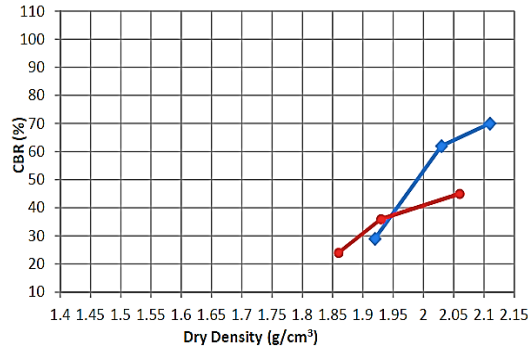
در این پژوهش، رابطه دانسیته-رطوبت برای هر مخلوط مطابق روش اصلاح شده AASHTO T180-D01-2004 تخمین زده شده است [۲۵]. برای مخلوط‌های آزمایش شده، منحنی‌های شکل (۱۵) تغییرات دانسیته خشک با محدوده رطوبت را نشان می‌دهد. مقادیر رطوبت بهینه (OMC) و حداکثر دانسیته خشک (MDD) از منحنی‌های آزمایش تراکم مطابق جدول (۶) آمده است.



شکل ۱۵- منحنی‌های رطوبت- دانسیته

#### جدول ۶- خلاصه مقادیر OMC و MDD

مصالح	MDD ( $g/cm^3$ )	OMC (%)
۱۰۰٪ RCA	۱/۶۹	۱۰/۰۹
۲۰٪ RCA+۸۰٪ NA	۱/۸۴	۹/۸۶
۵۰٪ RCA+۵۰٪ NA	۱/۹۸	۹/۴۱
۲۰٪ RCA+۸۰٪ NA	۲/۰۰	۹/۱۹
۱۰۰٪ NA	۲/۱۱	۸/۲۳



شکل ۲۲- رابطه CBR و دانسیته خشک برای NA ۱۰۰٪

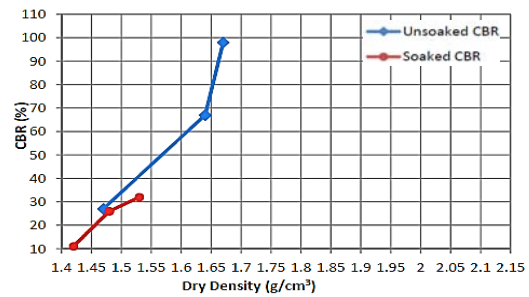
نتایج آزمایشات CBR در جدول (۷) به طور خلاصه نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد کلیه مخلوط‌ها، CBR بزرگ‌تر از ۲۵٪ که حداقل CBR لازم مطابق نشریه ۲۳۴ است را دارا می‌باشند.

جدول ۷- مقادیر CBR اشباع و خشک حاصل از نمونه‌های متراکم در ۶۵ ضربه

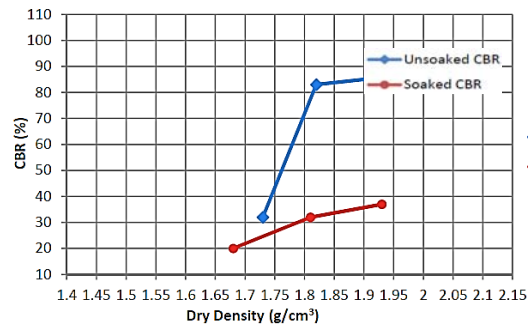
مصلح	CBR اشباع (%)	CBR اشباع نشده (%)
RCA ۱۰۰٪	۳۲	۹۸
۸۰٪ RCA+۲۰٪ NA	۳۷	۸۶
۵۰٪ RCA+۵۰٪ NA	۴۰	۸۰
۲۰٪ RCA+۸۰٪ NA	۴۲	۷۹
۱۰۰٪ NA	۴۵	۷۰

این نتایج نشان می‌دهند که در شرایط اشباع نشده (خشک)، مصالح RCA ۱۰۰٪ بیشترین مقدار CBR را که ۹۸٪ می‌باشد، دارا است. هم‌چنین با افزایش درصد NA در مخلوط، مقدار CBR خشک نیز کاهش می‌یابد. این رفتار منجر به کاهش کلی در مقاومت نهایی مصالح می‌گردد. کاهش CBR اشباع برای مصالح RCA ۱۰۰٪ به مراتب بیشتر از مصالح NA ۱۰۰٪ می‌باشد که این رفتار می‌تواند به دلیل جذب آب بالای مخلوط‌های دارای نسبت بالای RCA باشد.

مقادیر منفی نتایج تورم بر روی مخلوط‌های آزمایش در جدول (۸) نشان دهنده این هستند که طی مدت فرآیند اشباع به جای تورم منقبض شده‌اند که این رفتار می‌تواند به دلیل تأثیر واکنش هیدراتاسیون سیمان باقی‌مانده در RCA باشد.

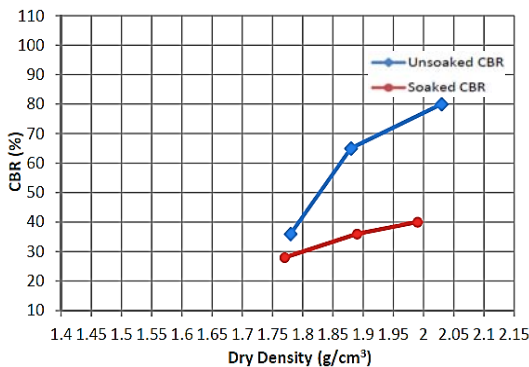


شکل ۱۸- رابطه CBR و دانسیته خشک برای RCA ۱۰۰٪



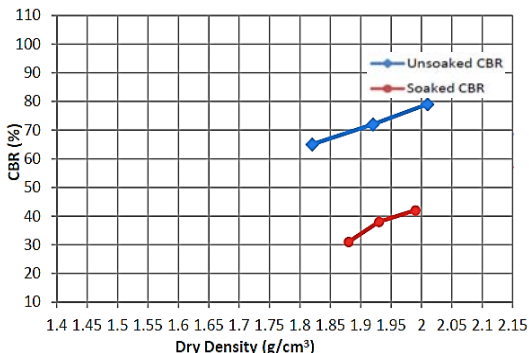
شکل ۱۹- رابطه CBR و دانسیته خشک برای

۲۰٪ NA + ۸۰٪ RCA



شکل ۲۰- رابطه CBR و دانسیته خشک برای

۵۰٪ NA + ۵۰٪ RCA



شکل ۲۱- رابطه CBR و دانسیته خشک برای

۲۰٪ NA + ۸۰٪ RCA



سولفات سدیم در بالا رفتن کاهش وزن نقش دارد [۲۸] که این مسئله باعث می‌شود آزمایش محلول سولفات منیزیم برای کسب نتیجه قابل اعتمادتر استفاده گردد. شکل‌های (۲۵) تا (۲۷) به ترتیب دانه ترک خورده، دانه جدا شده و دانه ترک خورده جدا شده را برای مصالح NA ۱۰۰٪ که داخل سولفات سدیم غوطه‌ور است نشان می‌دهد.



شکل ۲۵- دانه ترک خورده در مصالح NA ۱۰۰٪



شکل ۲۶- دانه جدا شده در مصالح NA ۱۰۰٪



شکل ۲۷- دانه ترک خورده جدا شده در مصالح NA ۱۰۰٪

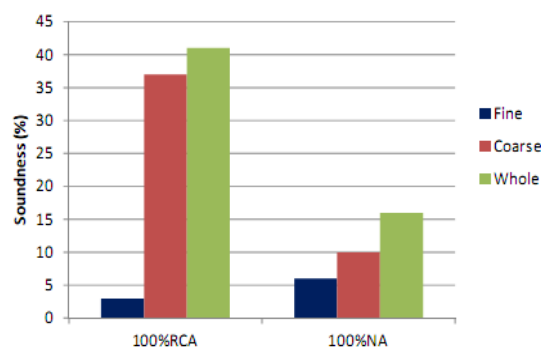
جدول ۸- مقدار تورم بعد از ۹۶ ساعت اشباع

ضربه ۶۰	ضربه ۳۰	ضربه ۱۰	مواد
٪-۰.۱۱	٪-۰.۱۱	٪-۰.۱۱	RCA ۱۰۰٪
٪-۰.۱۱	٪-۰.۲۲	٪-۰.۱۱	٪۸۰ RCA+٪۲۰ NA
٪-۰.۱۱	٪-۰.۲۲	٪-۰.۱۱	٪۵۰ RCA+٪۵۰ NA
٪-۰.۱۱	٪-۰.۱۱	٪-۰.۲۲	٪۲۰ RCA+٪۸۰ NA
٪-۰.۲۲	٪-۰.۱۱	٪-۰.۴۴	٪۱۰۰ NA

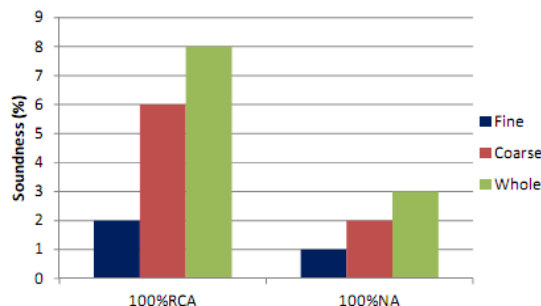
#### ۵-۷- آزمایش ساندنس با استفاده از سولفات سدیم/

##### منیزیم

جهت تعیین مقاومت سنگ‌دانه‌ها به جدانشدگی که توسط سولفات سدیم و منیزیم اشباع شده‌اند، آزمایش ساندنس بر اساس AASHTO T104-99-2003 صورت پذیرفت [۲۷]. نتایج آزمایش در شکل‌های (۲۳) و (۲۴) نشان می‌دهند که NA ۱۰۰٪ نسبت به جدانشدگی مقاوم‌تر از ذرات RCA ۱۰۰٪ بوده و در شرایط ذوب و یخبندان درشت‌دانه‌های RCA ۱۰۰٪ ضعیف‌تر از NA ۱۰۰٪ عمل می‌کنند. برعکس ریزدانه‌های RCA ۱۰۰٪ در شرایط ذوب و یخبندان بهتر از NA ۱۰۰٪ عمل می‌کنند.



شکل ۲۳- مقایسه نتایج ساندنس با سولفات سدیم



شکل ۲۴- مقایسه نتایج ساندنس با سولفات منیزیم

با توجه به مقادیر بالای ساندنس سولفات سدیم، این مصالح ملزومات آیین‌نامه روسازی ایران که حداکثر ۱۲٪ است، را دارا نمی‌باشد [۲۸]. واکنش ملات سیمان چسبیده به ملات RCA و

- [4] The Highway Agency, "Standards for Highways; Manual of Contract Document for Highway Works (MCHW) - Vol. 1: Specification for Highway Works", 2009.
- [5] The Highway Agency, "Standards for Highways; Design Manual for Roads and Bridges (DMRB) - Vol. 7: Pavement Design and Maintenance, Section 1: Preamble, Part 2, HD 35/04: Conservation and the Use of Secondary and Recycled Materials", 2004.
- [6] Tam, V. W. Y., Wang, K., Tam. C. M., "Assessing Relationships among Properties of Demolished Concrete, Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete using Regression Analysis", Journal of Hazardous Materials, 2007, (152), 703-714.
- [7] Construction Materials Recycling Association, <http://www.cdrecycling.org/>, 2005.
- [8] Environmental Protection Department <http://www.info.gov.hk/epd>, 2005.
- [9] Poon, C. S., "Management and Recycling of Demolition Waste in Hong Kong", The 2<sup>nd</sup> International Conference on Solid Waste Management, Taipei, Taiwan, 2000, pp 433-442.
- [10] Hendriks, Ch. F., Pietersen, H. S., "Sustainable Raw Materials-Construction and Demolition Waste", State-of-the-Art Report of RILEM TC 165-SRM, Report rep022, RILEM, 2000.
- [11] Chen, J., Brown, B., "Leaching Characteristics of Recycled Aggregate used as Road Base", Student Project Report, University of Wisconsin-Madison, 2012.
- [12] Malešev, M., Radonjanin, V., Marinković, S., "Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production", 2010.
- [13] Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M. D., Jiménez, J. R., "Construction of Road Sections Using Mixed Recycled Aggregates Treated with Cement in Malaga, Spain", Resources, Conservation and Recycling, 2012, 58, 98-106.
- [14] Barbudo, A., Agrela, F., Ayuso, J., Jiménez, J. R., Poon, C. S., "Statistical Analysis of Recycled Aggregates Derived from Different Sources for Sub-base Applications", Construction and Building Materials, 2012, 28, 129-138.
- [15] Vegas, I., Ibañez, J. A., Lisbona, A., Sáez de Cortazar A., Frías. M., "Pre-normative Research on the use of Mixed Recycled Aggregates in Unbound Road Sections", Construction and Building Materials, 2011, 25, 578-585.

#### ۵-۸- تعیین نسبت سیمان پرتلند در RCA

مقدار سیلیکات محلول در مصالح RCA حاصل از تخریب تونل امیرکبیر تهران، به وسیله روش ASTM C1084-02-2002 اندازه‌گیری شد. به این دلیل، دانه‌های RCA به ذرات ریزتر از ۴/۷۵ میلی‌متر خرد شدند. تجزیه شیمیایی این نمونه‌ها نشان داد که مقدار سیلیکات محلول در بتن خرد شده ۳/۱۲ درصد سیمان (C<sub>3</sub>) از تقسیم درصد سیلیکا (SiO<sub>2</sub>) در RCA به درصد سیلیکا در بتن تازه و حاصل ضرب آن در ۱۰۰ به دست آمد. مقدار سیلیکات سیمان ۲۱ درصد فرض گردید. طبق توصیه‌های استاندارد ASTM C1084-02-2002 از آن‌جا که دانسیته خشک بتن ۲/۱۲ گرم بر سانتیمتر مکعب بود، مقدار سیمان موجود در بتن مطابق این تجزیه و تحلیل ۳۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد [۲۹].

#### ۶- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشات بر روی دو نوع مصالح RCA و NA و ترکیبات آن‌ها که بر اساس نشریه ۲۳۴ تهیه شده‌اند نشان می‌دهند که مقادیر به دست آمده برای حد مایع، حد روانی، ارزش ماسه‌ای، سایش لس‌آنجلس، CBR و آزمایش ساندنس، به غیر از آزمایش ساندنس با سولفات سدیم، در بازه‌های خواسته شده هستند.

طبق مطالعات انجام شده، مشاهده گردید که استفاده از بتن بازیافتی و ترکیبات آن با مصالح طبیعی از نظر انطباق با مشخصات فنی جهت استفاده در لایه زیرساخت راه‌ها بلامانع است. جهت اطمینان بیشتر برای استفاده از مصالح RCA در لایه‌های مختلف راه، بررسی‌های عملکردی توصیه می‌شود.

#### ۷- مراجع

- [1] The Waste and Resources Action Programme (WRAP), "The Quality Protocol for the Production of Aggregates from Inert Waste", 2005.
- [2] The Waste and Resources Action Programme (WRAP), "The sustainable aggregates information service from WRAP (AggRegain); AggRegain Material Information-Recycled concrete aggregate (RCA)", 2006.
- [3] British Standards Institution, "BS 8500-1:2006; Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1, Part 1: Method of Specifying and Guidance for the Specifier", London, UK, 2006.

- Materials in Civil Engineering, 2002, 14 (3), 239-245.
- [24] American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO Designation T 84-00: Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate", 2007.
- [25] American Association of State Highway and Transportation Officials", AASHTO Designation T 180-01: Standard Test Method for Moisture-density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 4.57-mm (18-in) Drop", 2004.
- [26] American Association of State Highway and Transportation Officials", AASHTO Designation: T 193-99: The California Bearing Ratio", 2003.
- [27] American Association of State Highway and Transportation Officials", AASHTO Designation T 104-99: Standard Test Method for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate", 2003.
- [28] Chini, A. R., Kuo, S. S., Armaghani, J. R., Duxbury, J. P., "Test of Recycled Concrete Aggregate in Accelerated Test Track", Journal of Transportation Engineering, 2001, 127 (6), 486-492.
- [29] American Society for Testing and Materials, "ASTM Standard C 1084-02: Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete; Annual Book of ASTM Standards", ASTM International, West Conshohocken, PA, US, 2002.
- [۱۶] دفتر نظام اجرایی، "آئین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران، نشریه شماره ۲۳۴"، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۸۹.
- [۱۷] دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی، "مشخصات فنی و عمومی راه، نشریه شماره ۲۳۴"، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۲.
- [18] American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO Designation: T89-02: Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils", 2007.
- [19] American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO Designation: T90-00: Standard Test Method for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils", 2004.
- [20] American Society for Testing and Materials, "ASTM Standard: D 2419-02: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate; Annual Book of ASTM Standards", ASTM International, West Conshohocken, PA, US, 2002.
- [21] American Society for Testing and Materials, "ASTM Standard C 131-06: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine; Annual Book of ASTM Standards", ASTM International, West Conshohocken, PA, US, 2006.
- [22] Blankenagel, B. J., Geuthrie, W. S., "Laboratory Characterization of Recycled Concrete for Use as Pavement Base Material, Transportation Research Record", Journal of the Transportation Research Board, 2006, 21-27.
- [23] Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K., Al-Zubeidi, M., "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases", Journal of

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Laboratory Investigation of Recycled Concrete Aggregates for Use in Subbase Layer of Roads**

Vahid Ayan <sup>a</sup>, Seyed Masoud Nasr Azadani <sup>b</sup>, Alireza Khavandi <sup>c</sup>, Mohammad Hossein Aminfar <sup>d,\*</sup>, Javad Alizadeh Someeh <sup>e</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil Engineering, Islamic Azad University (IAU), Islamshahr Branch, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Department of Railway Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

<sup>c</sup> Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Faculty of Engineering, Zanjan, Iran

<sup>d</sup> Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>e</sup> Department of Civil Engineering, Islamic Azad University (IAU), Ahar Branch, Ahar, Iran

**Received:** 20 February 2014; **Accepted:** 25 August 2014

---

### **Keywords:**

Natural aggregate, Recycled concrete aggregates, Pavement, Subbase, Construction wastes

---

### **1. Introduction**

Pavement foundation layers play a crucial role in construction and in-service loads. Unbound subbase as a layer of foundation can be constructed by natural and recycled materials. Over last two decades, sustainable development has been a prominent issue in all infrastructures and need for sustainable highway design, construction, maintenance and rehabilitation is becoming a priority for companies which work in highway industry. Each year, millions of tonnes of construction waste are produced from old buildings demolishing, poor drainage kerbs and pavement blocks renewal works, redesign or reconstruction of structures in Iran, which are carried to landfills placed outside the cities.

The analysis of cost for demolishing, equipments and machineries, transportation and stockpiling showed that a huge cost is enforced on the government construction budget [1]. Dwindling number of landfills, diminishing of natural resources, increasing costs of extraction in quarries and transporting to the required projects on the one hand and adverse environmental impacts of the extraction and disposal on the other hand persuade a developing country such as Iran to take essential steps for recycling the construction and demolition wastes.

### **2. Methodology**

There are two main documents governing highway works in Iran: (i) Iran Highway Asphalt Paving Code [2] and (ii) Road General Technical Specifications [3]. The framework of these codes is based on the designations of AASHTO and ASTM. The chapter dealing with subbase in Iranian codes recommends five grading types which all must meet the requirements. In this research, Atterberg limits, SE, lose Angeles abrasion, CBR, soundness tests were performed on NA and Recycled concrete aggregates (RCA) mixes. There is much experience in the use of RAP as base and subbase material in Iran and extensive studies on these materials have been carried out. However, the use of RCA in Iran is only in its infancy. For this reason, there is as yet no special code relevant to be developed for the application of RCA. Therefore, for this research, the AASHTO specifications which cover the use of RCA were used as an unbound granular subbase material.

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: vahidayan@iiu.ac.ir (Vahid Ayan), nasrazadani@iust.ac.ir (Seyed Masoud Nasr Azadani), akhavandi@iust.ac.ir (Alireza Khavandi).

### 3. Results and discussion

The following results were found between RCA and NA and their mixes:

- From the point of view of Atterberg limits, the mixes of NA and RCA are non-plastic which is a perfect property for subbase material.
- SE of all mixes is acceptable and 100%RCA had got the least undesirable dust with sand equivalent of 76%.
- The results of LAA test and degradation after compaction test showed that the subbase materials including NA will show high resistance to fragmentation under traffic loads. Moreover all mixes met the requirements of Iran Highway Asphalt Paving Code relating LAA test designation.
- The compaction test result proved that 100%NA had got higher MDD and lower OMC than those of other mixes which were 2.12 gr/cm<sup>3</sup> and 7.78%, respectively.
- The results of unsoaked and soaked CBR demonstrated that the mixes including RCA had a better performance in dry conditions than those of wet condition. 106% of unsoaked CBR of 100%RCA is very noticeable property, but significant decrease in its CBR (27%) after immersing in water showed that increment of moisture content in wet seasons weaken the subbase layer made with 100%RCA. The CBR test results proved that all mixes are suitable under Iran Highway Asphalt Paving Code requirements for shear strength.
- Durability test by saturated solution of sodium sulphate showed that replacing NA by RCA decreased subbase resistance to freeze-thaw subject to weathering action. But, changing the procedure and solution to magnesium sulphate gave more accurate durability results, so that the aggregate met the soundness requirements.

### 4. Conclusions

Recycled aggregate is strongly advocated by the municipality of Tehran through motivating contractors to setting up the central recycling plant, implementing a practice guidelines, and modifying the codes and regulations in guiding the use of recycled aggregate. This research led the government to issue a master plan in recycle and reuse of municipal waste for some of Iran's metropolises, introducing some clauses to Highway Asphalt Paving Code and application of these principles in major projects. This paper presented some of the experimental results of an investigation on the application of recycled concrete and natural aggregates mixes as aggregate in unbound subbase materials.

### 5. References

- [1] Blankenagel, B. J., Geuthrie, W. S., "Laboratory Characterization of Recycled Concrete for Use as Pavement Base Material, Transportation Research Record", Journal of the Transportation Research Board, 2006, 21-27.
- [2] Office of the Deputy for Technical Affairs, "Iran Highway Asphalt Paving Code, No. 234", Iran Management and Planning Organization, Technical Affairs and Standards Bureau, 2003.
- [3] Office of the Deputy for Technical Affairs, "Iran Code for Highway Design, Road General Technical Specifications, No. 101", Iran Management and Planning Organization, Technical Affairs and Standards Bureau, 2003.