

## بررسی مقاومت مصالح حاصل از بازیافت نخاله‌های ساختمانی جهت استفاده در لایه‌های روسازی

جعفر بلوری‌بزاز\*، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
محمد مهدی زنجانی، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
E-mail: bolouri@ferdowsi.um.ac.ir  
دریافت: ۱۳۸۸/۰۹/۱۱ - پذیرش: ۱۳۸۹/۰۹/۲۳

### چکیده

حجم روزافزون مواد و زباله‌های شهری به ویژه نخاله‌های حاصل از تخریب ساختمان‌ها و بافت‌های فرسوده شهری، مشکلات فراوانی را در شهرهای بزرگ به وجود آورده است. مشکلات زیست محیطی که در اثر دفع غیر اصولی و غیر فنی این مصالح پدید آمده، توجه پژوهشگران در راستای بازیافت این مواد را به خود جلب کرده است. آمارهای موجود از ترکیب نخاله‌های ساختمانی شهرهای بزرگ ایران نشان می‌دهد که آجر و ملات ماسه سیمان/بتن، دو ماده اصلی تشکیل‌دهنده نخاله‌های ساختمانی هستند. در تحقیق حاضر امکان بازیافت این مصالح و بکاربردن آنها به طور مستقیم و یا پس از بهسازی و تثبیت، در لایه‌های روسازی راه و یا زیراساس مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا آزمایش‌های وسیع فیزیکی و مکانیکی بر روی آجر، ملات ماسه سیمان و یا ترکیباتی از دو ماده انجام پذیرفت. نتایج آزمایش‌ها بیانگر قابل استفاده بودن این مصالح در زیر اساس و در راه‌های درجه دو هستند. به منظور افزایش کیفیت این مصالح، دو روش مورد استفاده قرار گرفته است. در روش اول با جایگزینی مصالح با مصالح مرغوب، افزایش CBR<sup>۱</sup> و در روش دوم با افزودن سیمان با درصد‌های مختلف مصالح بازیافتی، مقاومت فشاری این مواد بررسی شده است. آزمایش‌های تکمیلی بیانگر افزایش کیفیت و قابل استفاده بودن این مصالح در لایه‌های راهسازی است.

واژه‌های کلیدی: نخاله‌های ساختمانی، بازیافت، لایه‌های روسازی راه، بهسازی، تثبیت

### ۱. مقدمه

[Wahlstrom, (et.al.), 2002] و در دو شهر اصلی استرالیا، سالانه نزدیک ۰/۷ میلیون تن بتن از تخریب ساختمان‌ها بر جای می‌ماند [Nataatmadja, and Tan, 2000]. حجم بسیار زیاد نخاله‌های ساختمانی و دفع غیر اصولی آنها مشکلات فراوانی برای شهرها ایجاد کرده که اهم آنها عبارتند از:

- مشکلات زیست محیطی [Jang and Townsend, 2001].
- مسائل بهداشتی [La Cross and Graves, 2000].
- نیاز به مکان دفن زباله
- ایجاد چشم‌انداز نامناسب

افزون بر مسایل فوق، به دلیل نیاز روز افزون به مصالح سنگی، برداشت از منابع طبیعی که اغلب در مسیر رودخانه‌ها وجود دارند، منجر به بروز سیلاب‌های خطرناک شده است. همچنین ریختن نخاله‌های ساختمانی در کنار و یا بستر رودخانه‌ها موجب تغییر نظام طبیعی رودخانه و ورود مواد مضر موجود در این نخاله در چرخه آبهای زیرزمینی می‌شود (شکل ۱).

در کشورهای در حال توسعه، نخاله‌های ساختمانی بخش بزرگی از زباله شهری را به خود اختصاص می‌دهند که علاوه بر هزینه بسیار برای دفع آن، عواقب نامطلوبی بر محیط زیست نیز دارند. حجم نخاله‌های ساختمانی به حدی است که اکنون این مسئله نه تنها در ایران بلکه در کشورهای پیشرفته نیز یک مشکل اجتماعی و زیست محیطی است [Poon, Kou and Lam, 2002]. بازیافت نخاله‌های ساختمانی نه تنها به حفظ منابع طبیعی و محیط زیست کمک می‌کند، بلکه با بکارگیری روش‌های علمی، توجیه اقتصادی نیز دارد. از طرف دیگر بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی برای ساخت راه‌ها، تولید بتن، آجر و سایر مصالح ساختمانی، کمبود مصالح طبیعی را نیز در پی داشته است. حجم نخاله‌های بنایی ناشی از تخریب ساختمان‌ها در کشورهای اروپایی رقم بزرگی را در بر می‌گیرد، به گونه‌ای که طرفداران محیط زیست بیش از پیش نگران بهداشت جامعه شده‌اند. در کشور فنلاند بیش از یک میلیون تن ضایعات ساختمانی

• یکی از بهترین مکان‌های استفاده از نخاله‌های بازیافتی، لایه‌های روسازی راه است، به گونه‌ای که در اکثر کشورها این موضوع در حال بررسی است [Akash, 2007, Huang, 2003, Rockliff, 2000]. با توجه به کمبود مصالح مناسب راهسازی که اغلب، مصالح رودخانه‌ای و یا سنگ شکسته حاصل از استخراج معادن هستند و نیز هزینه زیاد استحصال و حمل این مصالح، در مورد بهره‌گیری از مصالح بازیافتی در اکثر کشورهای توسعه یافته نظیر آلمان، هلند، بلژیک و نروژ تحقیقات زیادی صورت پذیرفته و نیز استانداردهای ویژه‌ای برای استفاده از این مصالح تدوین شده است [Rockliff, 2000, Penning, 1989 and Suss, 1989]. موضوع بازیافت نخاله در ایران دارای سابقه طولانی نیست و بنابراین دسترسی به آمار دقیق میزان تولید و نیز ترکیب نخاله در سال‌های قبل مشکل است. در شهر مشهد که از یک بافت قدیمی و فرسوده برخوردار است، سالانه نزدیک به یک میلیون تن نخاله بنایی تولید می‌شود که در سه محوطه مختلف دفن می‌گردند [شهرداری مشهد، ۱۳۸۵]. ترکیبات اصلی نخاله‌های ساختمانی که امکان بازیافت آنها بیشتر است آجر، بتن و ملات ماسه سیمان است. در تحقیق حاضر امکان استفاده آجر به تنهایی و یا ترکیب آجر و بتن به عنوان مصالح اساس یا زیراساس، مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور پس از نمونه‌گیری و تعیین ترکیبات نخاله‌ها، آزمایش‌های لازم بر روی مصالح برگزیده انجام شد تا کیفیت نخاله‌های بازیافتی را به عنوان مصالح راهسازی بتوان بررسی کرد.

## ۲. نمونه‌گیری و تعیین ترکیبات نخاله

برای تعیین ترکیب و درصد مواد مختلف در نخاله‌ها ۲۵ نمونه، هر یک به وزن ۲۵ کیلوگرم در روزها و هفته‌های گوناگون و نیز از سه سایت مختلف محل دپوی نخاله گرفته شد. هر نمونه ابتدا روی الک نمره ۱ (۲۵ میلی‌متر) الک شد تا بخش ریزدانه آن جدا شود. سپس مواد گوناگون به صورت دستی تفکیک و توزین شد. جدول ۱ نتیجه این بررسی را که شامل درصد مصالح ریزدانه (رد شده از الک) و مصالح درشت‌دانه (مانده روی الک، شامل آجر، بتن/ملات ماسه سیمان، گچ، آسفالت، سنگ و کاشی) است، نشان می‌دهد. جدول مقادیر متوسط با بررسی ۲۵ نمونه تهیه شده است.



شکل ۱. ریختن نخاله ساختمانی در مسیر رودخانه، تهدیدی برای محیط زیست

جنبه‌های اقتصادی بازیافت نخاله‌های ساختمانی نیز در کنار مسایل فنی آن، به همان مقدار دارای اهمیت است. مهم‌ترین عوامل توجیه اقتصادی بازیافت نخاله ساختمانی عبارت است از:

- هزینه زیاد مصالح اولیه
- هزینه حمل نخاله از محل تولید به مکان دفع
- هزینه دفن نخاله

البته آشکار است که بازیافت نخاله نیز هزینه‌بر بوده و ممکن است در کوتاه مدت توجیه اقتصادی نداشته باشد، اما افزایش روزافزون بهای مصالح اولیه و نیز خسارت‌های غیر قابل جبران زیست‌محیطی بلند مدت، موضوع بازیافت نخاله‌های ساختمانی را مهم می‌نماید [Robinson (et.al.), 2000].

کاربری نخاله‌های ساختمانی بازیافت شده به عوامل زیادی نظیر حجم و ترکیب نخاله، ماشین‌آلات بازیافت نخاله، میزان تقاضا، کیفیت مصالح تولیدی، نیاز پروژه‌های عمرانی به نوع مصالح حاصل و هزینه مواد خام اولیه بستگی دارد. در حال حاضر مصالح حاصل از بازیافت در دو زمینه زیر بیشترین استفاده را دارد:

- بتن: در کشورهای اروپایی که اکثر حجم نخاله‌ها را بتن تشکیل می‌دهد، در مورد امکان استفاده از بتن بازیافتی در بتن جدید، پژوهش‌های زیادی انجام شده و معیارهایی نیز برای استفاده از بتن‌های بازیافتی در بتن جدید ارائه شده است [Chi and Dixon, 2006 and Dhir (et.al.), 2000].
- همچنین استفاده از خرده آجر بازیافتی برای تهیه آجر و بلوک‌های بتنی که با قالب‌گیری قابل تهیه است، توجه محققین بسیاری را به خود جلب کرده است [Poon, 2002 and Akash, 2007]. در همین راستا مراکز پژوهشی نظیر انستیتو بتن آمریکا (ACI) دستورالعمل‌هایی برای روش تخریب بتن، بازیافت و استفاده از آن در بتن جدید ارائه کرده‌اند [ACI, 2002].

#### جدول ۱. درصد مصالح گوناگون در نخاله‌های ساختمانی

| مصالح   | مصالح درشت‌دانه (مانده روی الک) |      |     |        |      |
|---------|---------------------------------|------|-----|--------|------|
|         | آجر                             | بتن  | گچ  | آسفالت | سنگ  |
| ریزدانه | ۲۳/۸                            | ۱۳/۲ | ۱/۵ | ۴/۹    | ۴/۶  |
|         |                                 |      |     |        | کاشی |
|         |                                 |      |     |        | ۲/۳  |

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بیش از نیمی از نخاله‌های ساختمانی، درشت دانه بوده و امکان بازیافت آنها وجود دارد. اگر چه تحقیق حاضر بر آجر و بتن متمرکز است، اما آشکار است که به دلیل بیشتر بودن مقاومت سنگ نسبت به آجر، سنگ را نیز می‌توان به عنوان بتن یا آجر در نظر گرفت.

### ۳. برنامه آزمایشگاهی

با توجه به مصرف زیاد آجر در صنعت ساختمان‌سازی و تولید آن توسط کارخانه‌ها و یا کوره‌های آجرپزی گوناگون، ممکن است کیفیت آن، آن‌گونه که باید، کنترل نشود. بنابراین تعجب ندارد که خواص مکانیکی آجرها با یکدیگر تفاوت چشمگیری داشته و مطابق با استاندارد ایران نباشند [موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۱].

در استاندارد ایران، آجر رسی به سه نوع مهندسی، نما و توکار تقسیم شده که نوع سوم آن که به آجرگری معروف است، معمولاً از کیفیت نامناسبی برخوردار است. این موضوع در مورد بتن و ملات ماسه سیمان بازیافتی نیز صادق است، زیرا کیفیت بتن‌های تخریب شده کاملاً متفاوت بوده و ملات ماسه سیمان معمولاً مصالحی ضعیف‌تر از بتن است.

با توجه به اینکه در صد آجرگری نسبت به آجر فشاری در مصالح حاصل از تخریب ساختمان‌ها بسیار بیشتر و نیز مقاومت آن نسبت به آجر فشاری کمتر است، بنابراین آزمایش‌های تکمیلی فقط بر روی آجرگری انجام شده است. از طرف دیگر سعی شده بتن‌های مورد استفاده، برگرفته از ملات ماسه سیمان و یا بتن‌های با کیفیت نامناسب باشند.

آشکار است که در صورت برآورده شدن الزامات آیین‌نامه‌ها، تعمیم این مقادیر کمینه به آجر فشاری و یا بتن مرغوب که از کیفیت مناسب‌تری برخوردارند به اطمینان نزدیک‌تر است. در این تحقیق به منظور بررسی امکان استفاده از نخاله‌های ساختمانی در راهسازی، آزمایش‌های زیاد و وسیعی شامل آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی بر روی مصالح اولیه (آجر و بتن/ملات ماسه سیمان) انجام شده که جزئیات آن در بخش‌های بعدی آورده شده است.

### ۴. مشخصات فیزیکی مصالح

به منظور بررسی کارایی آجر و ملات ماسه سیمان به عنوان مصالح اساس یا زیر اساس، ابتدا آزمایش‌های اصلی برای بررسی خواص مکانیکی این مصالح به طور جداگانه انجام شده و سپس با خرد و دانه‌بندی کردن آنها و انجام آزمایش‌های لازم، سایر مشخصات بررسی شده است. در این تحقیق بسته به نوع آزمایش، از آیین‌نامه‌های گوناگون استفاده شده که شرح آزمایش و شماره استاندارد آن در جدول ۲ آورده شده است.

#### ۴-۱ وزن مخصوص و درصد جذب آب

با انتخاب ده نمونه اتفاقی از هر نوع مصالح و انجام آزمایش‌های لازم، وزن مخصوص در حالت اشباع با سطح خشک،  $W_{ssd}$ ، و درصد جذب آب،  $W_{abs}$  انواع مصالح تعیین شد که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود آجر به علت داشتن درصد جذب آب زیاد و وزن مخصوص نسبی کم، از مصالح با کیفیت نامناسب تلقی می‌شود. این موضوع در مورد ملات ماسه سیمان با وزن مخصوص کم نیز صادق است.

#### ۴-۲ حدود اتربرگ

این آزمایش بر روی بخش مصالح ریزدانه رد شده از الک نمره ۴۰ (۰/۴۲۵ میلی‌متر) انجام می‌گیرد، بنابراین پس از خرد کردن مصالح چهارگانه فوق و الک کردن، آزمایش بر روی آنها انجام شد. با توجه به جنس بتن و ملات ماسه سیمان و نیز تغییر ماهیت خاک رس بکار رفته در آجر بر اثر پخت، هیچگونه مصالح ریزدانه رسی در نمونه‌ها وجود نداشته و از مصالح دانه‌ای یا غیرخمیری محسوب می‌شوند. با توجه به مقادیر حد روانی و نشانه خمیری (مندرج در نشریه ۱۰۱ برنامه و بودجه) که به ترتیب نباید از ۲۵ و ۶ درصد افزون گردد، این مقادیر در محدوده مجاز قرار دارند [مشخصات فنی عمومی راه، ۱۳۷۳].

#### ۴-۳ دوام پذیری

دوام مصالح مورد استفاده در راهسازی در برابر شرایط محیطی همیشه مورد توجه مهندسين بوده است. اثرات شیمیایی و شرایط نامساعد جوی چون یخبندان، اثرات جبران ناپذیری بر ساختار راه دارد. آزمایش دوام که کوششی است برای شناخت بیشتر مصالح، بر روی مصالح دانه‌ای به صورت تفکیک شده که در معرض ۵ سیکل متوالی اشباع کردن در محلول سولفات سدیم به

## بلوری بزاز و زنجانی

مدت ۱۸ ساعت و سپس خشک کردن مصالح در گرمخانه قرار می‌گیرند، انجام می‌پذیرد. در انتهای ۵ سیکل، افت وزنی به صورت مجزا برای مصالح ریز دانه و درشت دانه شامل مجموعه‌ای از دانه‌ها با ابعاد متفاوت و با عبور دادن از همان الک مورد استفاده در ابتدای آزمایش، محاسبه می‌شود. نتایج آزمایش دوام بر روی مصالح آجری و بتنی برای مصالح درشت دانه و ریز دانه به ترتیب در جدول ۴- الف و ۴- ب آورده شده است.

جدول ۲. آزمایش‌های انجام شده روی آجر، بتن و ترکیبات گوناگون آنها

| شرح آزمایش   | کد استاندارد   | شرح آزمایش  | کد استاندارد   |
|--|--|---|--|
| وزن مخصوص و درصد جذب آب<br>حدود اتربرگ<br>دوام پذیری<br>مقاومت در برابر یخ زدن و ذوب شدن<br>ارزش ماسه‌ای | ASTM C127<br>ASTM D4318<br>ASTM C88<br>AASHTO T103<br>ASTM D2419 | لس آنجلس برای مصالح زیراساس<br>لس آنجلس برای مصالح اساس<br>دانه بندی با الک<br>تراکم<br>CBR | ASTM C131<br>ASTM C535<br>ASTM D5760<br>ASTM D1557<br>ASTM D1883 |

جدول ۳. وزن مخصوص اشباع و درصد جذب آب مصالح بازیافتی

| W <sub>abs</sub> (%) | γ <sub>SSD</sub> (t/m <sup>3</sup> ) |                 |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------|
| ۲۲/۷                 | ۱/۵۱                                 | آجر گری         |
| ۲۲/۱                 | ۱/۶۱                                 | آجر فشاری       |
| ۸/۰۵                 | ۲/۱۹                                 | بتن خردشده      |
| ۹/۳۱                 | ۱/۹۵                                 | ملات ماسه سیمان |

جدول ۴. الف: میزان افت مصالح درشت دانه در آزمایش دوام

| ملات سیمان     |                | آجر            |                | نمره الک |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|
| P <sub>T</sub> | P <sub>I</sub> | P <sub>T</sub> | P <sub>I</sub> |          |
| ۳۸/۸           | ۹۱/۷           | ۶/۳            | ۱۳/۹           | ۵۰-۳۷/۵  |
| ۱۱/۱           | ۴۸             | ۱/۸            | ۸/۲            | ۳۷/۵-۲۵  |
| ۸/۲            | ۶۹/۴           | ۰/۵            | ۳/۸            | ۲۵-۱۹    |
| ۷/۹            | ۳۴/۷           | ۲/۴            | ۱۰/۷           | ۱۹-۹/۵   |
| ۶۶             |                | ۱۱             |                | جمع کل   |
| ۶۶             |                | ۱۱             |                | جمع کل   |

جدول ۴. ب: میزان افت مصالح ریز دانه در آزمایش دوام

| ملات سیمان     |                | آجر            |                | نمره الک  |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| P <sub>T</sub> | P <sub>I</sub> | P <sub>T</sub> | P <sub>I</sub> |           |
| ۲۶/۵           | ۶۱/۹           | ۱/۷            | ۳/۹            | ۹/۵-۴/۷۵  |
| ۷/۲            | ۵۰/۳           | ۱/۱            | ۷/۷            | ۴/۷۵-۲/۳۶ |
| ۲/۸            | ۱۹/۶           | ۰/۵            | ۳/۱            | ۲/۳۶-۱/۱۸ |
| ۱/۶            | ۱۱/۲           | ۰/۵            | ۳              | ۱/۱۸-۰/۶  |
| ۰/۴            | ۲/۹            | ۰/۴            | ۲/۷            | ۰/۶-۰/۳   |
| ۳۸/۵           |                | ۴              |                | جمع کل    |

جدول ۵. الف. میزان افت مصالح درشت‌دانه در آزمایش

یخ‌زدن و ذوب شدن

| نمره الک | آجر   |       | ملات سیمان |       |
|----------|-------|-------|------------|-------|
|          | $P_T$ | $P_I$ | $P_T$      | $P_I$ |
| ۵۰-۳۷/۵  | ۰/۷   | ۰/۴   | ۳۶/۸       | ۲۰/۲  |
| ۳۷/۵-۲۵  | ۳/۷   | ۰/۷   | ۴۹/۱       | ۹     |
| ۲۵-۱۹    | ۴/۱   | ۰/۳   | ۴۳/۵       | ۳/۷   |
| ۱۹-۹/۵   | ۴/۸   | ۰/۹   | ۶۲/۸       | ۱۱/۳  |
| جمع کل   |       | ۲/۳   |            | ۴۴/۳  |

جدول ۵. ب. میزان افت مصالح ریزدانه در آزمایش

یخ‌زدن و ذوب شدن

| نمره الک  | آجر   |       | ملات سیمان |       |
|-----------|-------|-------|------------|-------|
|           | $P_T$ | $P_I$ | $P_T$      | $P_I$ |
| ۹/۵-۴/۷۵  | ۱۲/۵  | ۲/۸   | ۶۱/۷       | ۱۲/۳  |
| ۴/۷۵-۲/۳۶ | ۱۴/۷  | ۳/۱   | ۴۰/۹       | ۸/۱   |
| ۲/۳۶-۱/۱۸ | ۸/۸   | ۱/۶   | ۵۶/۴       | ۱۱/۵  |
| ۱/۱۸-۰/۶  | ۹/۵   | ۱/۸   | ۱۱/۲       | ۲/۲   |
| ۰/۶-۰/۳   | ۱۷/۱  | ۳/۳   | ۵/۸        | ۱/۲   |
| جمع کل    |       | ۱۲/۶  |            | ۳۵/۳  |

پس از انجام ۱۰ سیکل و خشک کردن کامل، مصالح روی همان الک اولیه ریخته می‌شود تا میزان افت مصالح به دست آید. نتایج این آزمایش برای مصالح درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب در جدول ۵-الف و ۵-ب ارائه شده است.

همان‌گونه که از نتایج ارائه شده در جداول ۵ ملاحظه می‌شود، میزان افت برای بتن / ملات ماسه سیمان در این آزمایش کمتر از آزمایش با سولفات سدیم است، اما مشابه آزمایش قبل، میزان افت بتن / ملات ماسه سیمان باز هم بیش از افت آجر است. البته باید یادآور شد که مصالح دارای قابلیت یخ‌زدن را می‌توان با افزودن تثبیت‌کننده‌ها و یا افزودنی‌های هیدرولیکی، در مقابل یخ‌زدن مقاوم کرد.

#### ۴-۵ ارزش ماسه‌ای

این آزمایش که به منظور تعیین میزان مواد ریز انجام می‌شود بر روی مصالح رد شده از الک نمره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) انجام می‌پذیرد. با توجه به اینکه آزمایش‌های مکانیکی (آزمایش تراکم و CBR)

در این جدول،  $P_T$  و  $P_I$  به ترتیب درصد افت در همان اندازه الک و درصد افت نسبت به کل مصالح است. در اثر اشباع شدن مصالح در سولفات سدیم و نفوذ آن به خلل و فرج مصالح و سپس خشک شدن و نیز اثر شیمیایی، بافت مصالح، سست و ضعیف شده و به تدریج خرد می‌گردد [Lay, 1990]. ترکهای ناشی از واکنش شیمیایی که در نمونه آجر پس از ۵ سیکل قرار گرفتن در محلول سولفات سدیم (آزمایش دوام) ایجاد شده در شکل ۲ دیده می‌شود. با توجه به درصد بالای جذب آب آجر شاید در ابتدا به نظر رسد که آجر نسبت به بتن و ملات ماسه سیمان، مصالح ضعیف‌تری از نظر دوام است، اما از هم پاشیدن و خرد شدن بتن و ملات ماسه سیمان (حدود ۶۶ درصد، جدول ۴) در انتهای ۵ سیکل، بیانگر دوام بسیار خوب آجر در این آزمایش است. دلیل این امر اثر مخرب سولفات بر نمونه‌های بتنی است. بنابراین بررسی وضعیت دوام مصالح بتنی با انجام آزمایش یخ‌زدن و ذوب شدن ضروری به نظر می‌رسد [Robinson (et.al.), 2000].



شکل ۲. تاثیر نمک سولفات سدیم بر روی آجر و خرد شدن نمونه

#### ۴-۴ مقاومت در برابر یخ‌زدن و ذوب شدن

به منظور بررسی مقاومت مصالح در برابر یخ‌زدگی و عوامل جوی بر روی مصالح، مصالح ریزدانه و درشت‌دانه، به طور مجزا به تعداد ده سیکل در معرض یخ‌زدن و ذوب شدن متوالی قرار گرفتند. به این منظور آجر و ملات ماسه سیمان را پس از خرد کردن و دانه بندی، اشباع کرده و در ظرفی پلاستیکی پر از آب به مدت ۲۴ ساعت در سردخانه با درجه حرارت  $17^{\circ}\text{C}$  قرار داده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در فضای آزمایشگاه در درجه حرارت  $25^{\circ}\text{C}$  نگهداری می‌کنند. این دوره از آزمایش به عنوان یک سیکل یخ‌زدن و ذوب شدن در نظر گرفته می‌شود.

توجه به نتایج آزمایش‌های (جدول ۷) در محدوده مجاز است. البته این کار به منظور بهبود بخشیدن به میزان افت ترکیب مصالح بازیافتی با مصالح مرغوب مورد استفاده در اساس و زیراساس، راه حل مناسبی به نظر می‌رسد. این موضوع در بخش‌های بعدی مقاله مورد توجه قرار گرفته است.

### ۵. مقاومت مکانیکی مصالح بازیافتی

استفاده از آجر در صنعت ساختمان سازی در ایران دارای سابقه طولانی است، به گونه‌ای که استفاده از دیوارهای باربر آجری برای ساختمان‌های چهار طبقه تا سال‌های اخیر معمول بود. همچنین استفاده از آجر برای سیستم سقف که به طاق ضربی مشهور است، متداول‌ترین نوع سقف در ایران بوده است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که آجر بیشترین سهم را در نخاله داشته باشد. ملات ماسه سیمان (و یا بتن) نیز از مصالحی است که دارای نسبت بالایی در نخاله است.

بنابراین به منظور بررسی امکان بازیافت مصالح درشت‌دانه در راهسازی، آجر و بتن/ملات ماسه سیمان، آزمایش‌های تکمیلی روی این مصالح و یا ترکیب آنها انجام شد. با توجه به متغیر بودن درصد آجر و بتن چهار نمونه با ترکیب گوناگون زیر در نظر گرفته شده است.

- ترکیب شماره (۱): ۱۰۰٪ آجر
- ترکیب شماره (۲): ۸۵٪ آجر و ۱۵٪ بتن
- ترکیب شماره (۳): ۷۰٪ آجر و ۳۰٪ بتن
- ترکیب شماره (۴): ۵۵٪ آجر و ۴۵٪ بتن

به منظور بررسی رفتار مکانیکی و کیفیت نخاله‌های ساختمانی جهت استفاده در راهسازی، آزمایش‌های تراکم و CBR، بر روی چهار دسته مصالح فوق (پس از دانه‌بندی بر اساس آیین‌نامه) انجام شده‌اند. در بخش‌های بعدی نتایج آزمایش‌ها ارائه می‌شوند.

### ۱-۵ دانه‌بندی

نظر به اینکه در این تحقیق، امکان استفاده از نخاله در لایه‌های روسازی راه مورد بررسی قرار گرفته است، بنابراین منحنی‌های دانه‌بندی که توسط آیین‌نامه برای لایه‌های روسازی ارائه شده و معمولاً دارای حد بالا و پایین برای ابعاد دانه‌هاست مورد استفاده قرار گرفته است. مصالحی که دانه‌بندی آنها در محدوده پیشنهادی قرار گیرد عملاً متراکم‌تر شده و در نتیجه مقاومت بیشتری از

بر روی ترکیب آجر و ملات/بتن انجام شده است، بنابراین ارزش ماسه‌ای مصالح آجری به تنهایی و نیز ترکیب آن با درصد‌های گوناگون ملات/بتن تعیین شده که نتیجه آن در جدول ۶ دیده می‌شود. همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود ارزش ماسه‌ای مصالح بازیافتی بین ۷۰ تا ۷۴ درصد است که مقدار آن براساس مشخصات فنی عمومی راه بسیار بیشتر از حداقل مجاز (۲۵٪)، مندرج در نشریه ۱۰۱ وزارت برنامه و بودجه) است [مشخصات فنی عمومی راه، نشریه ۱۰۱، ۱۳۷۳]. دلیل این موضوع مقدار کم مصالح رسی و ریزدانه در این مصالح بوده و نشانگر شبه دانه‌ای بودن آنهاست. باید یادآوری شود که آزمایش‌های تکمیلی بر روی ترکیب مصالح نشان داده شده در جدول ۶، انجام شده که در بخش ۵ شرح داده شده است.

جدول ۶. ارزش ماسه‌ای ترکیب مصالح

| ارزش ماسه‌ای | ترکیب مصالح              |
|--------------|--------------------------|
| ۷۰/۳۷        | آجر (۱۰۰)                |
| ۶۹/۴۳        | آجر (۸۵) + ملات/بتن (۱۵) |
| ۷۴/۰۰        | آجر (۷۰) + ملات/بتن (۳۰) |
| ۷۳/۳۳        | آجر (۵۵) + ملات/بتن (۴۵) |

### ۴-۶ افت در برابر ضربه و سایش

اساس این آزمایش محاسبه افت مصالح در اثر سایش و ضربه است که با استفاده از دستگاه لس‌آنجلس با تعداد ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور به ترتیب برای کنترل کیفیت مصالح زیراساس و اساس اندازه‌گیری می‌شود. به این منظور ۲/۵ کیلوگرم مصالح مانده روی الک ۱۹ و ۲/۵ کیلوگرم مانده روی الک ۱۲/۵ (مصالح زیراساس، دانه‌بندی نوع ۲ مندرج در استاندارد) انتخاب شده و در دستگاه ریخته می‌شود و پس از اتمام ۵۰۰ دور، مصالح از الک ۱/۷ میلیمتر عبور داده شده و افت مصالح محاسبه می‌شود. نتیجه این آزمایش در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷. افت مصالح در آزمایش لس‌آنجلس

| درصد افت | نوع مصالح |
|----------|-----------|
| ۴۹/۶     | آجر       |
| ۴۶/۵     | ملات/بتن  |

بر اساس مشخصات فنی عمومی راه، مندرج در نشریه ۱۰۱ برنامه و بودجه [مشخصات فنی عمومی راه، نشریه ۱۰۱، ۱۳۷۳] بیشینه مقدار افت مجاز در آزمایش لس‌آنجلس ۵۰ درصد است که با

خود نشان می‌دهند. دانه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق نوع II برای اساس و زیراساس است که توسط سازمان برنامه و بودجه ایران، نشریه ۱۰۱ [مشخصات فنی عمومی راه، نشریه ۱۰۱، ۱۳۷۳] ارایه شده است. دلیل استفاده از این دانه‌بندی وجود مصالح درشت‌دانه‌تر (به دلیل نیاز به شکستن و دانه‌بندی کردن) و احتمال اقتصادی‌تر بودن آن است. به این منظور، ابتدا آجر و ملات ماسه سیمان/بتن از میان نخاله‌ها تفکیک شده و سپس جداگانه، به‌وسیله دستگاه سنگ‌شکن آزمایشگاهی و نیز با استفاده از کوبه و به‌طور دستی شکسته و دانه‌بندی شدند. در شکل ۳ منحنی شماره II دانه‌بندی مصالح، براساس آیین‌نامه سازمان برنامه و بودجه، نشریه ۱۰۱ [مشخصات فنی عمومی راه، نشریه ۱۰۱، ۱۳۷۳] و نیز دانه‌بندی مورد استفاده، نشان داده شده است.

## ۲-۵ تراکم

تراکم مصالح که بیانگر کاهش فضای خالی بین دانه‌هاست به عوامل زیادی نظیر میزان رطوبت، وزن غلتک و میزان عبور آن وابسته است. میزان تراکم عملاً به نوع ترافیک (سبک، معمولی و سنگین) بستگی دارد. هنگام کنترل کیفیت مصالح در آزمایشگاه باید نوع راه و نیز لایه‌ای که قرار است مصالح مورد نظر استفاده شود مشخص گردیده و بر اساس آن نوع آزمایش انتخاب شود. به این منظور آزمایش تراکم براساس روش اصلاح شده D (ترافیک سنگین، تعداد ۵ لایه و هر لایه ۵۶ ضربه، ASTM D1557) و روش اصلاح شده C (ترافیک سبک و معمولی تعداد ۳ لایه و هر لایه ۲۵ ضربه، ASTM D1557) انجام شد. نتایج این سری از آزمایش‌ها برای روش D و C به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

در ارتباط با آزمایش تراکم، یادآوری دو نکته ضروری است:

- با توجه به اینکه آجر و بتن/ملات از نظر تنوع، مشخصات مکانیکی متفاوتی دارند و از طرفی نحوه خرد شدن این مصالح نیز از لحاظ گرد گوشه و یا تیز گوشه بودن، در رفتار این مصالح در آزمایش تراکم، تأثیر می‌گذارد، بنابراین برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، آزمایش‌های بیشتری انجام شد تا امکان دستیابی به یک محدوده قابل قبول برای نتایج به دست آید. جدول ۸ محدوده تغییرات وزن مخصوص بهینه و رطوبت بهینه با تکرار آزمایش تراکم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود دامنه تغییرات کم و قابل اعتماد است.
- پس از انجام آزمایش تراکم بر روی مصالح شکننده، به دلیل

شکستن دانه‌ها ممکن است جدایی دانه‌بندی<sup>۲</sup> اتفاق بیافتد. برای تحقق این موضوع پس از انجام آزمایش تراکم، مصالح مجدداً دانه‌بندی شدند. دانه‌بندی مجدد دو نمونه، پس از انجام آزمایش تراکم براساس روش D و C به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود عمل شکستن و خرد شدن دانه‌ها بر اثر آزمایش تراکم و اعمال ضربات اتفاق می‌افتد، ولی مقدار آن زیاد نیست و دانه‌بندی جدید نیز در میان منحنی‌های حدی پیشنهاد شده برای زیر اساس و اساس قرار دارد. به بیانی روشن‌تر، مصالحی نظیر آجر که دارای مقاومت زیادی (مانند سنگ) نیستند، هنگام تراکم ممکن است خرد شده و از حالت درشت‌دانه به ریزدانه تبدیل شوند. آشکار است که خردشدگی در مورد مصالح طبیعی نیز اتفاق خواهد افتاد، اما مقدار آن بسیار اندک است، به گونه‌ای که لزومی به کنترل آن نیست. اما در مورد مصالح حاصل از بازیافت نخاله‌های ساختمانی به دلیل کیفیت نامناسب آنها، اگرچه خردشدگی نسبت به مصالح طبیعی بیشتر بوده، ولی از محدوده مجاز پیشنهادی خارج نشده است. با توجه به اینکه مصالح دانه بندی شده از خرد کردن نخاله‌ها به دست می‌آیند باید محدوده انتخابی نزدیک به محدوده درشت‌دانه انتخاب شود تا پس از متراکم کردن، باز هم در محدوده مجاز قرار گیرند. در اثر جدایی دانه‌بندی نیز در تراکم به روش D و C تفاوت چشم‌گیری ندارد.

- جذب آب زیاد، از نقاط ضعف این مصالح به شمار می‌آید و ممکن است در اجرا مشکلاتی فراهم آورد. البته با توجه به نتایج آزمایش CBR که در بخش بعدی آمده است این مصالح بیشتر برای لایه‌های زیرین راه مناسب است که به تراکم کمتر و در نتیجه آب کمتری نیاز دارند. البته استفاده از نخاله‌های ساختمانی برای مناطق شهری که در آنها فاصله حمل به کمترین مقدار می‌رسد، توصیه می‌شود که در این حال معمولاً تأمین آب مشکلات کمتری دارد. به علاوه در این‌گونه موارد می‌توان با افزایش انرژی تراکم از مقدار آب مورد نیاز کاست. به این موضوع در بخش توجیه اقتصادی نیز اشاره شده است.

## ۳-۵ CBR

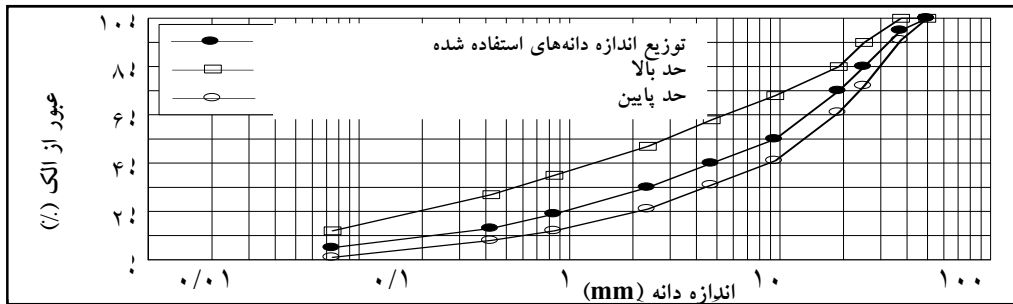
- مصالح بکار رفته در راهسازی باید ظرفیت باربری کافی را داشته باشند. نتایج آزمایش CBR (ASTM D1883) که روشی برای تعیین ظرفیت باربری مصالح راهسازی است، بر روی نمونه‌ها با درصد رطوبت بهینه و انرژی‌های متفاوت انجام شده و

اصلی آن این بوده است که اصولاً آجر و بتن مصالحی غیرچسبنده‌اند و اشباع بودن و یا نبودن آنها تغییر چشمگیری در مقاومت آنها ایجاد نمی‌کند.

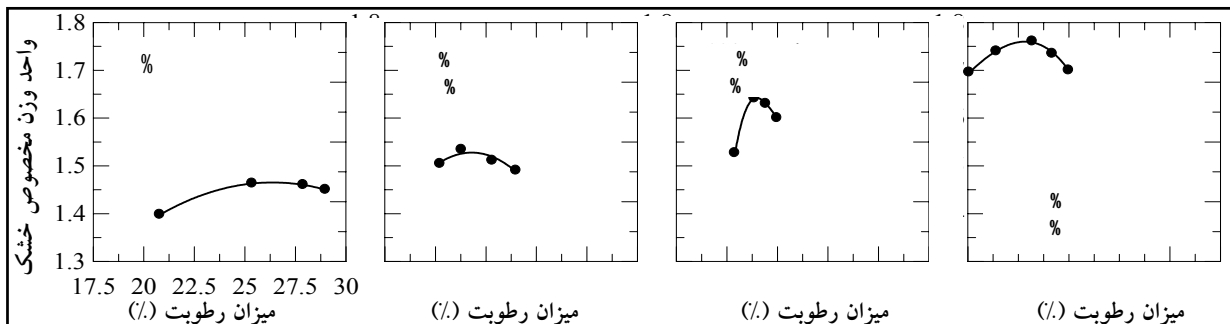
• از طرفی رطوبت بهینه آنها در آزمایش تراکم به رطوبت اشباع بسیار نزدیک بود. آزمایش‌های اولیه نشان دادند که به دلیل خاصیت زهکشی زیاد این مصالح، آب مازاد بر رطوبت مورد نیاز قبل از شروع آزمایش به سرعت خارج شده و عملاً تأثیر چشمگیری بر مقاومت ندارد.

برحسب وزن مخصوص خشک برای نمونه‌ها با ترکیب‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.

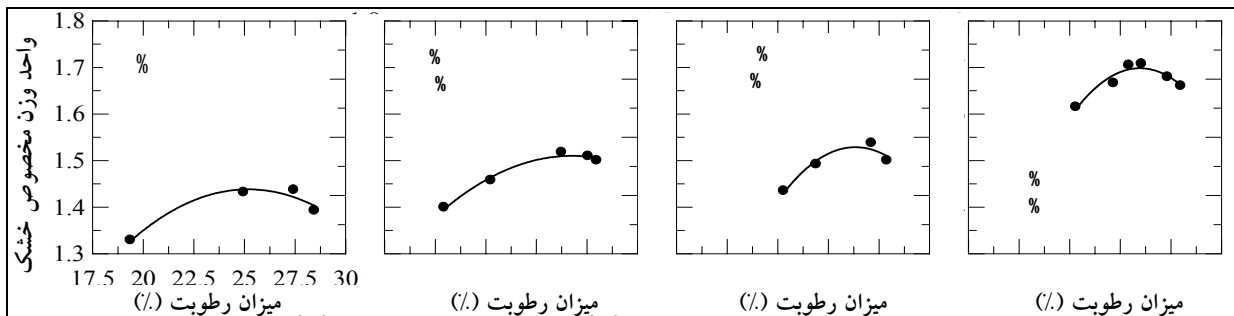
• همان‌گونه که در نمودارها مشخص است، مقادیر CBR با افزایش وزن مخصوص خشک افزایش می‌یابند. از طرف دیگر با افزایش مقدار ملات ماسه سیمان/بتن در ترکیب، CBR نیز افزایش می‌یابد، اما در هر حال با توجه به کیفیت آجر و ملات ماسه سیمان، مقدار CBR مصالح پایین است. لازم به ذکر است که آزمایش CBR در شرایط غیراشباع انجام شده که دلیل



شکل ۳. حد بالا، حد پایین و دانه‌بندی استفاده شده در این تحقیق



شکل ۴. نتایج آزمایش تراکم بر اساس روش ASTM D1557 (تراکم سنگین)

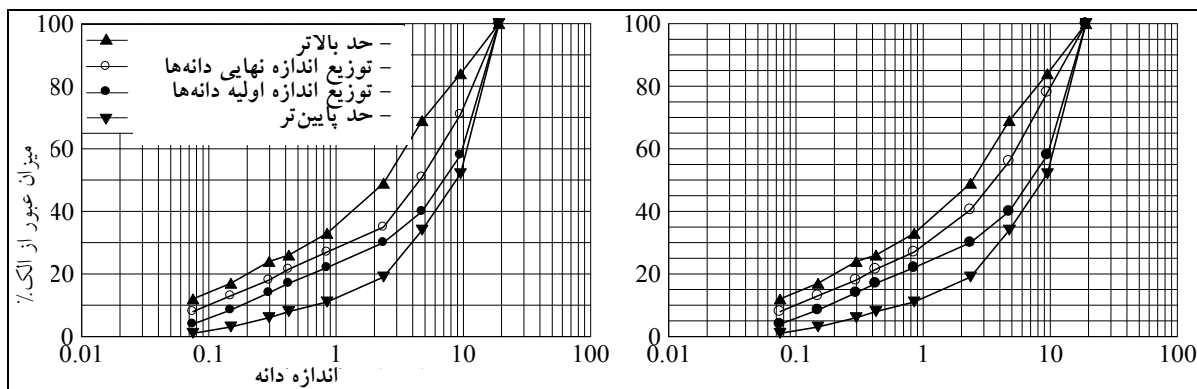


شکل ۵. نتایج آزمایش تراکم بر اساس روش ASTM C1557 (تراکم سبک)

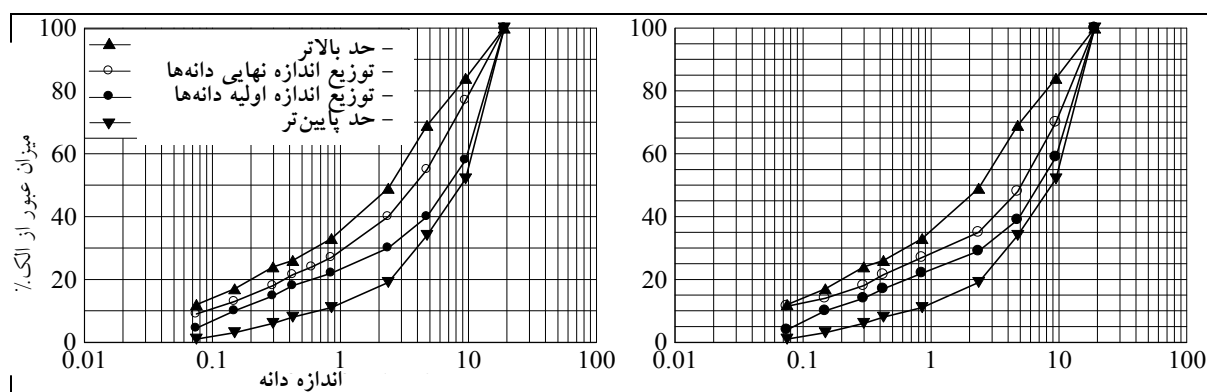
جدول ۸. محدوده تغییرات وزن مخصوص بهینه و رطوبت بهینه با تکرار آزمایش

| روش ASTM C1557   |                      | روش ASTM D1557   |                      | نوع ترکیب نمونه  |
|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
| W <sub>opt</sub> | γ <sub>d</sub> (max) | W <sub>opt</sub> | γ <sub>d</sub> (max) |                  |
| ۲۷/۵-۲۸/۵        | ۱/۴۱-۱/۴۹            | ۲۵-۲۷/۵          | ۱/۴۶-۱/۵۴            | ۱۰۰٪ آجر         |
| ۲۳/۶-۲۶/۶        | ۱/۵۲-۱/۵۶            | ۲۱/۵-۲۳          | ۱/۵-۱/۵۸             | ۸۵٪ آجر+۱۵٪ ملات |
| ۲۴-۲۷            | ۱/۵۴-۱/۶             | ۲۱/۴-۲۲          | ۱/۶-۱/۶۵             | ۷۰٪ آجر+۳۰٪ ملات |
| ۲۴/۲۵-۲۶         | ۱/۶۳-۱/۷۳            | ۱۹-۲۰/۷          | ۱/۶۸-۱/۷۶            | ۵۵٪ آجر+۴۵٪ ملات |

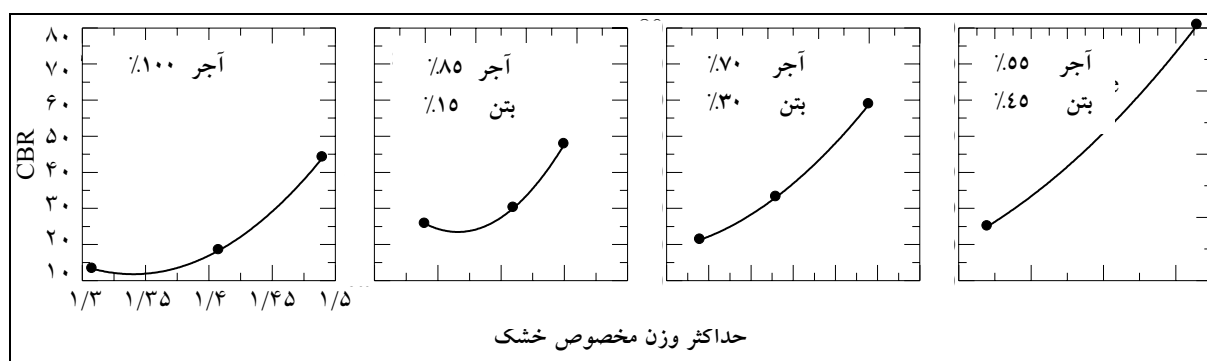




شکل ۶. منحنی دانه‌بندی پس از آزمایش تراکم و مقایسه آن با منحنی اولیه و منحنی‌های حدی (ASTM D1557)



شکل ۷. منحنی دانه‌بندی پس از آزمایش تراکم و مقایسه آن با منحنی اولیه و منحنی‌های حدی (ASTM C1557)



شکل ۸. تغییرات CBR با وزن مخصوص خشک

### ۶-۱ بهسازی مصالح بازیافتی با افزودن مصالح مرغوب

به منظور بهسازی مصالح بازیافتی، یک نوع از مصالح مرغوب که برای اساس و زیراساس بسیار مورد استفاده قرار گرفته، انتخاب و با مقادیر مختلف ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد با مصالح بازیافتی مخلوط شد.

#### ۶-۱-۱ مشخصات مکانیکی مصالح مرغوب

به منظور بررسی تغییراتی که مصالح مرغوب می‌تواند بر روی خواص مصالح بازیافتی بگذارد، پس از دانه‌بندی، سایر آزمایش‌های لازم انجام شد.

### ۶. بهسازی و تثبیت مصالح بازیافتی

همان‌گونه که قبلاً بیان شد یکی از نقاط ضعف آجر به عنوان مصالح بازیافتی، افت نسبی زیاد این مصالح در آزمایش لس‌آنجلس است.

روش‌های گوناگونی برای افزایش کیفیت مصالح وجود دارد که از میان این روش‌ها مخلوط کردن مصالح بازیافتی با مصالح مرغوب (بهسازی) و یا افزودن یک ماده شیمیایی به مصالح بازیافتی (تثبیت) است که در میان این مواد، سیمان به عنوان یکی از مواد تثبیت‌کننده در این تحقیق انتخاب شده است.

خشک و میزان رطوبت بهینه، شدیداً متأثر از درصد مصالح مرغوب است، به گونه‌ای که با جایگزینی ۵۰٪ مصالح بازیافتی با مصالح مرغوب نزدیک به ۴۰٪ رطوبت بهینه کاهش می‌یابد.

جدول ۱۱. نتایج آزمایش تراکم بر اساس روش ASTM D1557

| W <sub>opt</sub> (%) | γ <sub>d</sub> (gr/cm <sup>2</sup> ) |                 |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------|
| ۱۷                   | ۱/۷                                  | ۲۵٪ مصالح مرغوب |
| ۱۳                   | ۱/۹                                  | ۵۰٪ مصالح مرغوب |
| ۹                    | ۲/۱                                  | ۷۵٪ مصالح مرغوب |

### ۶-۱-۴ CBR مصالح ترکیبی

نتایج آزمایش‌های CBR بر روی مصالح ترکیبی بازیافتی و مصالح مرغوب که بیانگر اثر بهسازی بر مصالح بازیافتی است در شکل ۹ نشان داده شده است. با افزودن حتی ۲۵٪ مصالح مرغوب، می‌توان CBR مصالح ترکیبی را به مقدار چشمگیری افزایش داد.

### ۶-۲ تثبیت مصالح بازیافتی با سیمان به عنوان ماده افزودنی

یکی از روش‌های افزایش کیفیت مصالح بازیافتی، تثبیت این مصالح با ماده افزودنی قیر، سیمان یا آهک است. در بسیاری از مناطق که کمبود مصالح مرغوب وجود داشته و تهیه آن هزینه‌بر است، با استفاده از ماشین‌آلات ویژه راهسازی و بهره‌گیری از سیمان و قیر امولسیون، ظرفیت باربری لایه تثبیت شده، تا دو برابر افزایش یافته و نیز سرعت عملیات به گونه‌ای محسوس هزینه‌ها را کاهش می‌دهد [مرندی، صفاپور، ۱۳۸۵].

در این حال ارزیابی مشخصات مقاومتی مصالح تثبیت شده، با تعیین مقاومت فشاری نمونه در آزمایش تک محوری انجام می‌شود [Sherwood, 1993]. با توجه به ماهیت آجر و بتن بازیافتی دانه بندی شده که دانه‌ای و فاقد مصالح ریزدانه چسبنده هستند، سیمان یکی از مناسب‌ترین مواد افزودنی به نظر می‌رسد [Ingles and Metcalf, 1972]. همچنین دو نوع پوزولان با درصدهای مختلف سیلیس و آلومین برای تثبیت ماسه‌های روان استفاده شده است.

در این تحقیق افزایش ظرفیت باربری مصالح تثبیت شده براساس آزمایش CBR و مقاومت فشاری نامحدود مورد ارزیابی قرار گرفته است [حسنی و صالحی، ۱۳۸۴].

مشخصات مکانیکی مصالح مرغوب مورد استفاده، در جدول ۹ آورده شده است. نتایج آزمایش‌ها بیانگر کیفیت مطلوب مصالح است، به گونه‌ای که با مخلوط کردن این مصالح با مصالح بازیافتی، امکان ارتقاء کیفیت آن فراهم می‌شود.

### ۶-۱-۲ میزان ترکیب مصالح مرغوب با مصالح بازیافتی

به منظور بررسی عملکرد مصالح بهسازی شده، بخش مصالح بازیافتی شامل ۷۰ درصد آجر و ۳۰ درصد ملات ماسه سیمان انتخاب شد.

سپس مصالح بازیافتی با نسبت‌های اختلاط ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ با مصالح مرغوب مخلوط شده و آنگاه آزمایش لس‌آنجلس بر روی نمونه‌های جدید انجام پذیرفت. نتیجه آزمایش‌های فوق در جدول ۱۰ خلاصه شده است.

### جدول ۹. مشخصات مکانیکی مصالح مرغوب

|       |  |
|-------|--|
| ۶۹    | ارزش ماسه ای                               |
| ۱۴    | حد روانی                                   |
| NP    | دامنه خمیری                                |
| ۸۷    | درصد شکستگی                                |
| ۷/۴۳  | رد شده از الک ۲۰۰                          |
| ۲۵/۷۷ | افت در سایش لس‌آنجلس                       |
| ۲/۳۴  | وزن مخصوص خشک بیشینه (gr/cm <sup>3</sup> ) |
| ۵     | رطوبت بهینه ( )                            |

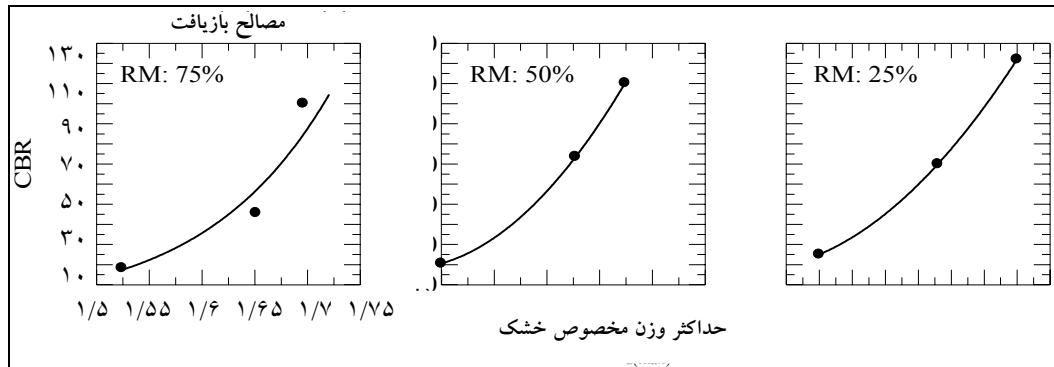
### جدول ۱۰. افت مصالح مخلوط شده در آزمایش لس‌آنجلس

| درصد مصالح مرغوب | درصد افت |
|------------------|----------|
| ۰                | ۴۸/۶۲    |
| ۲۵٪              | ۴۳/۴۲    |
| ۵۰٪              | ۳۶/۹۱    |
| ۷۵٪              | ۳۳/۸۰    |

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد مصالح مرغوب، افت مصالح کاهش می‌یابد. آشکار است که درصد مصالح مرغوب در ترکیب، با توجه به کمینه مقدار افت مورد نیاز برای راه، باید مورد نظر قرار گرفته و انتخاب شود.

### ۶-۱-۳ تراکم مصالح ترکیبی

نتایج آزمایش‌های تراکم بر روی مصالح ترکیبی نوع ۱ در جدول ۱۱ آورده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، وزن مخصوص



شکل ۹. مقدار CBR مصالح حاصل از ترکیب ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد آجر بازیافتی به ترتیب با ۷۵، ۵۰ و ۲۵ مصالح مرغوب

#### ۱-۲-۶ انتخاب درصد مناسب سیمان

تعیین درصد مناسب ماده افزودنی بر اساس نتایج آزمایشگاهی و تجربی است، اما تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از ۳/۵ تا ۷ درصد سیمان برای مصالح دانه‌ای مناسب است، به گونه‌ای که مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه متراکم شده با درجه تراکم ۱۰۰٪ باید حداقل ۲ مگاپاسکال باشد [Ingles and Metcalf, 1972]. به علاوه در اکثر مراجع، درصد مناسب برای سیمان بین ۳ تا ۷ درصد پیشنهاد شده است [نیازی، ۱۳۸۰].

در این تحقیق نیز مقدار سیمان برای تثبیت ۳، ۵ و ۷ درصد (ترکیب نخاله‌های انتخاب شده) برای آزمایش نمونه‌های شامل ۸۵٪ آجر + ۱۵٪ ملات، ۷۰٪ آجر + ۳۰٪ ملات و ۵۵٪ آجر + ۴۵٪ ملات بوده است. پس از افزودن درصد مورد نظر سیمان (۳، ۵ و ۷ درصد) و درصد رطوبت بهینه، نمونه‌ها به تراکم ۱۰۰٪ رسانده شد و پس از نگهداری به مدت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب تراکم که استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۱۵ سانتیمتر بود بیرون آورده شده و سپس با توجه به نوع سیمان که نوع II بود، نمونه‌ها به مدت ۱۱ روز در محیط کاملاً مرطوب عمل‌آوری شدند. یکی از نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. نمونه‌های تثبیت شده با سیمان

#### ۲-۲-۶ ترکیب نمونه‌های تثبیت شده

به منظور بررسی اثر وزن مخصوص بر مقاومت فشاری، نمونه‌های با درصد سیمان معین اما با وزن مخصوص متفاوت تهیه شدند و پس از عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند. برای بررسی اثر درصد آجر و ملات ماسه سیمان سه ترکیب زیر در نظر گرفته شدند:

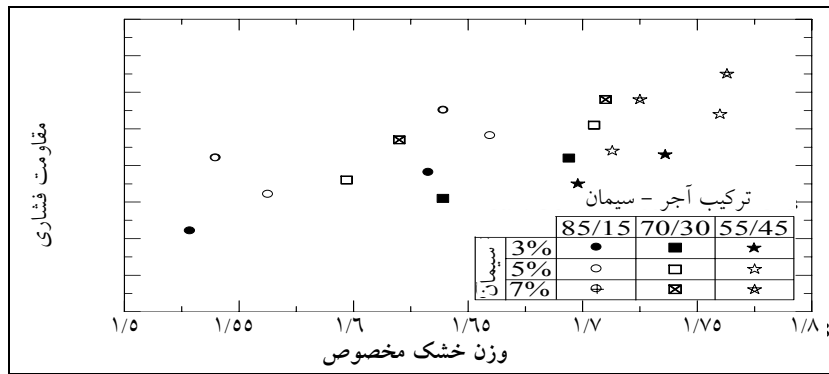
- ترکیب شماره (۱): ۸۵٪ آجر و ۱۵٪ ملات
- ترکیب شماره (۲): ۷۰٪ آجر و ۳۰٪ ملات
- ترکیب شماره (۳): ۵۵٪ آجر و ۴۵٪ ملات

هریک از ترکیبات فوق با ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان مخلوط شده و نمونه‌ها به ازاء هر درصد سیمان با دو وزن مخصوص متفاوت تهیه شدند. به منظور دستیابی به جواب دقیق‌تر، برای هر یک از ترکیبات فوق دو نمونه (به عبارتی درجمع ۳۶ نمونه) تهیه شد که مقاومت بیان شده در بخش بعدی میانگین مقاومت دو نمونه است. شکل ۱۰ یکی از نمونه‌های عمل‌آوری شده را قبل از آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد.

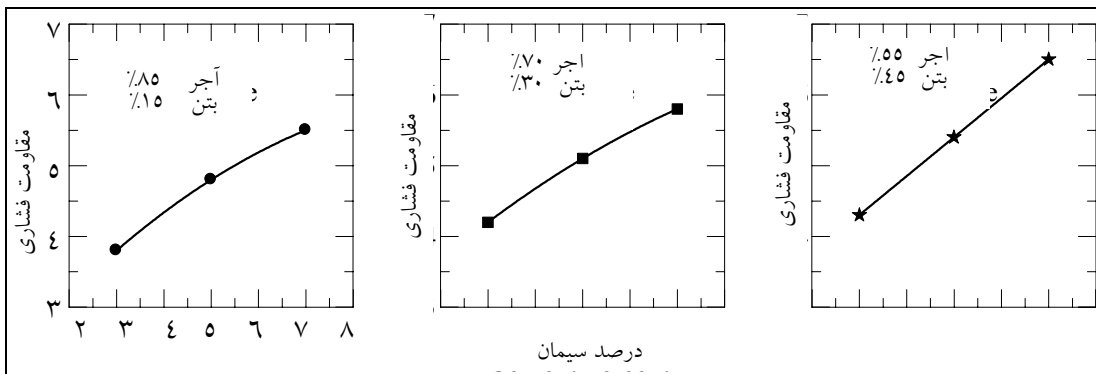
#### ۳-۲-۶ مقاومت فشاری نمونه‌ها

همان‌گونه که بیان شد به منظور بررسی اثر وزن مخصوص بر مقاومت فشاری، به ازاء مقدار معین سیمان، نمونه‌هایی با دو وزن مخصوص تهیه شدند. شکل ۱۱ نتایج آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود مقاومت فشاری با افزایش وزن مخصوص دچار افزایش می‌شود.

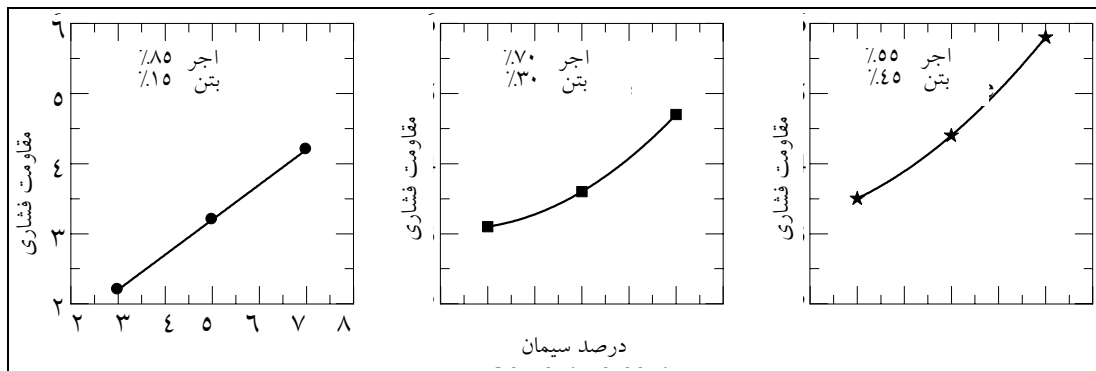
شکل ۱۲ و ۱۳ تغییرات مقاومت فشاری را با درصد سیمان برای هر دو نوع نمونه با وزن مخصوص بالا و پایین نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش مقدار سیمان، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. بسته به مقاومت مورد نیاز و نوع راه درصد مناسب سیمان را می‌توان تعیین کرد



شکل ۱۱. تغییرات مقاومت فشاری مصالح ترکیبی با وزن مخصوص



شکل ۱۲. تغییرات مقاومت فشاری مصالح ترکیبی با درصد سیمان با وزن مخصوص بالا



شکل ۱۳. تغییرات مقاومت فشاری مصالح ترکیبی با درصد سیمان با وزن مخصوص پایین

## ۷. توجیه اقتصادی

در مهندسی عمران استفاده مجدد از مصالح بازیافتی مانند بتن و آسفالت است. شاید مهم‌ترین دلایل بازیافت را بتوان در سه نکته خلاصه کرد:

الف: محدود بودن مصالح مرغوب در طبیعت

ب: نبود مکان مناسب و نزدیک برای دفن نخاله

ج: آسیب جبران ناپذیر محیط زیست

همان‌گونه که بیان شد اگرچه بازیافت بیشتر مصالح ممکن است اقتصادی نباشد، اما این طرح (حتی بدون توجه به خسارات وارد به محیط زیست) با توجه موارد زیر اقتصادی خواهد بود:

لازم به یادآوری است که هدف اصلی از این تحقیق بررسی امکان استفاده از نخاله‌های ساختمانی (به ویژه بخش درشت دانه آن) در راهسازی بوده است، فارغ از اینکه آیا نسبت به استفاده از مصالح طبیعی امری اقتصادی است یا خیر. از طرفی اگر بازیافت هرگونه مصالح نظیر بتن، آسفالت، شیشه و حتی کاغذ و پلاستیک با در نظر گرفتن مشکلاتی که برای محیط زیست ایجاد می‌کنند نگرینسته نشود، شاید بازیافت اصولاً اقتصادی نباشد. اما همان‌گونه که مشاهده می‌شود، یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیق

الف: حمل نخاله از داخل به خارج شهر به مقدار ۵۰ هزار ریال به ازای هر متر مکعب برای هر شهروند هزینه (و به عبارتی درآمدی برای شهرداری) خواهد داشت که بخشی از آن برای حمل نخاله به فاصله بیش از ۳۰ کیلومتر بوده و بقیه هزینه دپوی آن است.

ب: بهای مصالح زیر اساس و اساس (شامل تهیه، شکستن، سرنده و دانه‌بندی کردن و حمل آن از خارج به داخل شهر) به ترتیب حدود ۶۰ و ۱۲۰ هزار ریال است.

پ: هزینه حمل نخاله بنایی از محل تولید به مرکز جداسازی (که باید نزدیک شهر باشد) حدود ۲۰ هزار ریال به ازای هر متر مکعب.

ت: سرنده کردن مصالح ریزتر از ۲۵ میلی‌متر دانه، جداسازی مصالح قابل بازیافت از مصالح مضر و در انتها شکستن و دانه‌بندی مجدد به ازای هر متر مکعب به ترتیب حدود ۲۰، ۲۵ و ۳۰ هزار ریال به ازای هر متر مکعب و جمعاً ۷۵ هزار ریال.

ث: حمل از محل بازیافت به محل مصرف (در داخل شهر) ۲۰ هزار ریال به ازای هر متر مکعب.

بنابراین هزینه تولید و حمل نخاله برابر است با:

$$\text{ریال } 115000 = (20+75+20) \times 1000 = \text{هزینه کل}$$

$$\text{ریال } 65000 = (115-50) \times 1000 = \text{هزینه تمام شده}$$

۵۰ هزار ریال از هزینه فوق در حال حاضر از مردم دریافت می‌شود. بنابراین هزینه یک متر مکعب مصالح بازیافتی تقریباً برابر مصالح زیر اساس خواهد بود. البته آشکار است که این مقادیر تقریبی بوده و برای یک پروژه که به همین منظور تعریف شده محاسبه شده است و اگر این فرآیند مکانیزه شود هزینه کاهش می‌یابد. به هر حال برآورد دقیق پس از استقرار یک سایت با تجهیزات کامل برای جداسازی مصالح گوناگون از یکدیگر و دفع مصالح مضر میسر است.

## ۸. نتیجه‌گیری

با توجه به حجم روزافزون نخاله‌های حاصل از تخریب ساختمان‌های قدیمی و مشکلات ایجاد شده، ضرورت امر بازیافت بر هیچکس پوشیده نیست. اگرچه در ابتدا اقتصادی بودن موضوع مطرح است، اما باید قبل از هر چیز امکان استفاده از نخاله‌های ساختمانی بررسی شود. این تحقیق که کوششی در این

جهت است نتایج زیر را در بر داشته است:

- اصولاً مصالح بازیافتی نظیر بتن و آجر برای هر منظوری که بازیافت و مجدداً استفاده شوند، باید با دقت کافی و انجام کلیه آزمایش‌های لازم کیفیت انتخاب شده و سپس عملکرد آنها در پروژه‌های واقعی مورد بررسی قرار گیرند.

- چگونگی جداسازی مصالح مضر (نظیر چوب، فلز و شیشه) و مصالح گوناگون از یکدیگر، از پارامترهای مؤثر در این فرآیند است، به گونه‌ای که بسیاری از کارخانه‌های سازنده ماشین‌آلات راهسازی دستگاههایی را نیز به همین منظور اختراع کرده‌اند.

- آجر، اگرچه ظاهراً دوام خوبی ندارد، اما نسبت به ملات ماسه سیمان/ بتن دوام بیشتری از نظر اثرات شیمیایی داشته و از این جهت مناسب‌تر است. البته افت بالای ملات ماسه سیمان/ بتن در این آزمایش ناشی از اثر مخرب سولفات بر بتن است که انجام آزمایش دیگری را الزامی می‌سازد.

- نتایج آزمایش یخ زدن و ذوب شدن برای بررسی دوام مصالح در برابر عوامل جوی نیز بیانگر دوام بیشتر آجر نسبت به بتن است، بنابراین استفاده از نمونه‌های ترکیبی با درصد زیاد بتن/ ملات در لایه‌های فوقانی راهسازی ممکن است مشکل آفرین باشد.

- ارزش ماسه‌ای زیاد این مصالح به دلیل ماهیت دانه‌ای بودن آنها، امکان استفاده از آنها در راهسازی را فراهم می‌کند. خاصیت زهکشی زیاد آجر نیز از نکات مثبت این مصالح است.

- اگرچه افت زیاد مصالح آجری در آزمایش سایش (کمتر از ۵۰٪) از مقدار مجاز آیین‌نامه بیشتر نیست، اما به طور نسبی مقدار آن زیاد است که مخلوط کردن آن با مصالح مرغوب برای راههای با درجه اهمیت بیشتر، راه حل مناسب است.

- آجر به دلیل ماهیت متخلخل آن، وزن مخصوص ظاهری کمی دارد و با افزایش درصد آجر در نمونه‌ها، رطوبت بهینه افزایش یافته و وزن مخصوص خشک کم می‌شود.

- بهسازی مصالح بازیافتی با افزودن مصالح مرغوب تثبیت نیز می‌تواند راهی برای افزایش وزن مخصوص و ظرفیت باربری نمونه‌ها باشد.

- نتایج آزمایش CBR که بر روی نمونه‌های با تراکم مختلف انجام شد نشان می‌دهند که این مصالح به دلیل دانه‌ای بودن، دارای اصطکاک زیادند و تا حدی نیز تیز گوشه بوده و مقادیر

تعداد زیاد و بر روی نمونه‌های گوناگون انجام شود تا با یک تحلیل آماری بتوان با قطعیت بیشتر، به نتایج حاصل استناد کرد.

## ۹. سپاسگزاری

مطالعه حاضر نتیجه یک پروژه تحقیقاتی است که توسط سازمان بازافت شهرداری مشهد انجام شده است. از پشتیبانی مالی این نهاد برای انجام این تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

## ۱۰. پانویس‌ها

### 1. CBR: California Bearing Ratio

یک آزمایش اساسی برای ارزیابی مقاومت مکانیکی زیرساخت راه و لایه‌های زیرین آن است که اولین بار توسط اداره حمل و نقل ایالت کالیفرنیا آمریکا و قبل از جنگ جهانی دوم ابداع شد.

### 2. Thawing and Freezing

### 3. Degradation

## ۱۱. مراجع

- ACI Committee Report "Removal and reuse of hardened concrete" (2002) reported by ACI Committee 555, ACI Materials Journal.

- Akash, R., Kumar, N. J. and Sudhir, M. (2007) "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete", Resources Conservation and Recycling", 50, 71-81, Elsevier Ltd.

- Bowles, J. E. (1992) "Engineering properties of soil and their measurement", Fourth Edition, New York Mc Graw-Hill.

- Chi Sun, P. and Dixon, C. (2006) "Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick", Construction and Building Materials, 20 pp.569-577, Netherlands, Elsevier Ltd.

- Dhir, R. K., Henderson, N. A. and Limbachiya, M. C. (2000) "Use of recycled concrete aggregate", Unbound aggregates in road construction, Dawson R. H. (editors), Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR 5), Nottingham, U. K., Balkema A. A. Pub.

- Huang, W. L. , Lin, D. H. , Chang, N. B. and Lin, K. S. (2003) "Recycling of construction and demolishing waste via a mechanical sorting process", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 37, pp. 23-37.

CBR آنها در حد مطلوب است و در محدوده مصالح مورد استفاده در زیرساخت راه قرار می‌گیرند. بسته به نوع ترافیک، بار چرخ خودرو و نوع سرویس‌دهی راه، استانداردهای گوناگونی ارائه شده‌اند. انستیتو آسفالت، به عنوان مثال، جدول زیر را برای انواع آرایه کرده است [Bowles, 1992].

### جدول ۱۲. درجه بندی عدد CBR برای انواع لایه‌های روسازی

| عدد CBR | درجه بندی      | نوع استفاده    |
|---------|----------------|----------------|
| ۳-۰     | خیلی ضعیف      | سابگرید        |
| ۷-۳     | ضعیف تا معمولی | سابگرید        |
| ۲۰-۷    | معمولی         | زیر اساس       |
| ۵۰-۲۰   | خوب            | اساس، زیر اساس |
| > ۵۰    | عالی           | اساس           |

همان‌گونه که دیده می‌شود CBR مصالح بازیافتی اگرچه زیاد نیست، اما در محدوده لایه اساس و زیر اساس، به ویژه برای راه‌های با درجه اهمیت کمتر، مانند خیابان‌های فرعی قرار می‌گیرد.

• در هر حال، با توجه به کیفیت نامطلوب این مصالح و نظر به تحقیقات اندکی که در این رابطه در کشورمان انجام شده توصیه می‌شود این مصالح در لایه‌های زیرین و برای راه‌های فرعی و با ترافیک کم استفاده شود تا ضمن آشنایی بیشتر با عملکرد این مصالح در پروژه‌های واقعی، مشخصات منفی آنها بهتر شناسایی شده و راه حل‌های متناسب با آن آرایه شود.

• سیمان یکی از مواد افزودنی است که کیفیت و توان باربری مصالح بازیافتی را به خوبی می‌تواند افزایش دهد. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تثبیتی با درصد‌های متفاوت سیمان نشان می‌دهد برای استفاده در ساختمان لایه زیر اساس بسیار مناسب است.

• اگرچه آزمایش‌های انجام شده بر روی این مصالح از آزمایش‌های اصلی هستند که معمولاً برای لایه‌های اصلی پیشنهاد شده‌اند، اما در مراحل بعدی، آزمایش‌های تکمیلی مانند ضریب هدایت حرارتی مصالح برای تعیین عمق یخبندان و سایر آزمایش‌های تکمیلی باید انجام شود. از طرفی اگرچه تعداد آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق برای شروع کار مناسب است، اما هر یک از آزمایش‌های خاص (مانند تراکم) باید به

- Suss, G. H. (1989) "Specifications for materials used as an unbound aggregate", Unbound aggregates in road construction, editor: R. H. Jones, Balkema A. A. Pub. Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR 3), Nottingham.
- Wahlstrom, M., Laine, Y. J., Maattanen A., Luotojarvi T. and Kivekas, L. (2002) "Environmental assurance system for use of crushed mineral demolition waste in road construction", Waste Management, 20, pp. 225-232.
- حسینی، ابوالفضل و صالحی، محسن (۱۳۸۴) "بررسی تأثیر سیلیس و آلومین موجود در مواد افزودنی بر روند تثبیت ماسه‌های روان"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال دوم، شماره ۳، پاییز ۱۳۸۴، ص. ۱۹۱-۱۹۷.
- شهرداری مشهد، معاونت خدمات شهری (۱۳۸۵) "گزارش عملکرد سازمان بازیافت و تبدیل مواد زاید"، مشهد، شهرداری مشهد.
- مرندی، مرتضی و صفاپور، پروین (۱۳۸۵) "تثبیت لایه اساس با استفاده از تکنولوژی سیمان و امولسیون قیر (مطالعه موردی احداث راه اصلی دوغارون - هرات افغانستان)"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال سوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۸۵، ص. ۱۲۳-۱۳۸.
- سازمان برنامه و بودجه. دفتر تحقیقات و معیارهای فنی. مرکز مدارک و انتشارات. (۱۳۷۳) "مشخصات فنی عمومی راه"، نشریه ۱۰۱، ۱۳۷۳، معاونت امور فنی، سازمان برنامه و بودجه.
- مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (۱۳۸۱) "فرآورده آجررسی - ویژگی و روش آزمون"، استاندارد ملی ایران، شماره ۷.
- نیازی، یونس (۱۳۸۰) "تثبیت خاک‌های منتخب از حاشیه شرقی کویر نمک با آهک و سیمان"، نشریه دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، سال ۱۳، شماره ۱.
- stabilization, principles and practice", Sydney: Butter Worth.
- Jang, Y. and Townsend, T. (2001) "Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines", Advances in Environmental Research Journal, Vol. 5, pp. 203-217.
- La Cross, C. and Graves, R. E. (2000) "Recycling construction and demolition debris", Agricultural and Biological Engineering.
- Lay, M. G. (1990) "Transportation studies, Volume 8: "Handbook of road technology", 2<sup>nd</sup> edition, Gordon and Breach Science Pub.
- Nataatmadja, A. and Tan, Y. L. (2000) "The performance of recycled crushed concrete aggregates", Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Unbound Aggregates in Road Construction, A. R. Dawson (ed.), Nottingham, U.K.
- Penning, A. (1989) "Natural and waste materials – A chance for competition" Unbound Aggregates in Road Construction- Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR 3), Nottingham, U. K.
- Poon, C. S., Kou, S. C. and Lam, L. (2002) "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks", Construction and Building Materials, 16, pp. 281-289.
- Robinson, G. R., Menzie, W. D and Hyun, H. (2000) "Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 42, pp 275-294.
- Rockliff, D. (2000) "European standards for unbound mixtures – A status report", unbound aggregates in road construction, A. R. Dawson editor, Balkema A. A. Pub. , Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR 5), Nottingham, U. K.
- Sherwood, P. T. (1993) "Soil stabilization with cement and lime", State of the Art Report, London: HMSO Pub.