

استفاده از تحلیل سلسله مراتبی جهت ارزیابی محیط زیستی - فنی کاربرد پسماندهای ساختمانی و صنعتی در لایه‌های روسازی راه

محمد دنواز^{*۱}

delnavaz@khu.ac.ir

حسین حسن پور انزایی^۲

حسین زنگویی^۲

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۱۶

چکیده

زمینه و هدف: مدیریت کارآمد پسماند و حفظ محیط زیست از جمله مسایل حایز اهمیت در سایر زمینه‌های مهندسی از جمله راه‌سازی محسوب می‌شود. استفاده فراوان از مصالح طبیعی در ساخت و احیای راه‌ها، صدمات جبران‌ناپذیری به محیط طبیعی وارد می‌آورد. از این‌رو در این تحقیق استفاده از نخاله‌های حاصل از گودبرداری و سرباره مازاد کارخانه فولاد جهت به‌کارگیری در لایه‌های روسازی راه مورد بررسی قرار گرفت.

روش بررسی: برای این منظور آزمایش‌های حد روانی و خمیری، ارزش ماسه‌ای، سایش لس‌آنجلس، سلامت سنگ‌دانه‌ها، تراکم و CBR^3 انجام پذیرفته و با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۴ میزان قابل اعتماد بودن این مصالح با درنظرگیری عوامل مختلف تعیین گردید.

یافته‌ها: نخاله‌های ساختمانی با CBR برابر $36/2$ جهت استفاده در لایه زیراساس مناسب می‌باشند. از طرفی سرباره‌های فولادی ناشی از کوره قوس الکتریکی به دلیل نداشتن خاصیت چسبندگی به تنهایی قابلیت استفاده در لایه روسازی راه را نداشته و جهت برطرف کردن این مشکل به صورت ترکیبی با مصالح چسبنده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج نشان‌دهنده مطلوب بودن کاربرد نخاله‌های ساختمانی و نمونه ترکیبی ساخته‌شده با سرباره‌های فولادی و نخاله جهت استفاده در راه‌سازی با درنظرگیری عوامل مختلف موثر از جمله مسایل محیط زیستی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت پسماند، سرباره فولادی، نخاله‌های ساختمانی، روسازی راه، توسعه پایدار، تحلیل سلسله مراتبی (AHP).

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران * (مسوول مکاتبات).

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

3- California Bearing Ratio

4- Analytical Hierachy Process

Application of Analytical Hierarchy process (AHP) for environmental and technical assessment of using industrial and construction debris in road pavement layers

Mohammad Delnavaz^{1*}

delnavaz@khu.ac.ir

Hossein Hasanpour²

Hossein Zangoeei²

Abstract

Background and Objective: The efficient waste management and the environmental protection are important issues in engineering field especially in road construction. Excessive consumption of natural materials for construction and rehabilitation of roads damages the natural environment severely. Therefore, in this research, the use of excavation debris and the steel slag in the road pavement evaluated.

Methods: for this purpose, the experiments consisted of plastic and liquid limit, sand equivalent (SE), Los Angeles abrasion, soundness of aggregate and CBR test were done and the reliability of the materials was determined by several factors using Analytical Hierarchy Process (AHP).

Findings: The result of CBR test on debris was obtained 36.2 that indicated the quality of this debris for sub-base layer. On the other hand, the steel slag arising from electric arc furnace cannot be used alone in the pavement layer of road because of lack of adhesion properties and therefore the steel slag was mixed with adhesive materials.

Discussion and Conclusion: The results showed proper quality of construction debris and steel slag in road pavement by considering different factors especially environmental issues.

Keywords: Waste management, steel slag, construction debris, road pavement, Sustainable Development, Analytical Hierarchy Process (AHP)

1- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran-Iran. *(Corresponding Author)

2- MSc Student in Environmental Engineering, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran- Iran.

مقدمه

همواره فعالیت‌های انسانی باعث بروز آسیب‌های جدی و بعضاً جبران‌ناپذیر بر محیط زیست می‌گردد. از آن جمله می‌توان به بروز سیلاب‌های مخرب در اثر افزایش برداشت مصالح سنگی از بستر رودخانه‌ها جهت استفاده در فعالیت‌های عمرانی و ساختمانی اشاره نمود. همچنین دفع پسماندهای ساختمانی و عمرانی در کنار و یا بستر رودخانه‌ها باعث ورود مواد مضر موجود در این پسماندها به چرخه آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است. از طرف دیگر بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی جهت ساخت راه‌ها، تولید بتن، آجر و سایر مصالح ساختمانی، کمبود مصالح طبیعی را نیز در پی داشته است.

استفاده از ضایعات صنعتی ایجاد شده طی فرآیندهای صنعتی از جهات گوناگون حایز اهمیت است. کمک به حفظ و نگهداری منابع طبیعی غیرقابل جایگزین، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و بازیابی انرژی‌های صرف شده در طی تولید این ضایعات از جمله این موارد است (۱). تاریخچه استفاده از سرباره در زمینه‌های مختلف به بیش از ۲۰۰۰ سال بر می‌گردد. هم‌چنین طبق شواهد به‌دست آمده در روم باستان از مصالح دانه-ای سرباره برای عملیات راه‌سازی استفاده می‌شده است (۲). انجمن ملی سرباره^۱ از ابتدای تاسیس یعنی در سال ۱۹۸۸ فعالیت‌های تحقیقی خود را بر روی گسترش استفاده نوآورانه از سرباره متمرکز نموده است. امروزه از سرباره در بیشتر صنایع هم‌چون راه‌سازی، سیمان، بلوک‌های ساختمانی سبک، بتن‌های ساختمانی، بتن‌های آسفالتی و صنایع شیشه‌سازی و تصفیه فلزات سنگین از فاضلاب استفاده می‌گردد (۲). موتز و گیسلر^۲ (۲۰۰۱) نشان دادند که میزان انبساط حجمی سرباره فولاد برای استفاده در بتن آسفالتی و اساس دانه‌ای به ترتیب نباید از ۲ و ۵ درصد بیشتر باشد. مزایای استفاده از سرباره فولادی به عنوان اساس شامل سطح زبر سرباره فولادی به سبب تخلخل زیاد آن و قابلیت زه‌کشی آن نسبت به مصالح متعارف می‌باشد (۳). نتایج تحقیقی در سال ۲۰۰۷ نشان داد که سرباره در صورتی که به خوبی انتخاب شده و آزمایش گردد می‌تواند به

عنوان مصالح بسیار مرغوبی برای ساخت اساس و زیراساس مورد استفاده قرار گیرد (۴). امری و بهنود^۳ (۲۰۱۲) به این نتیجه رسیدند که برای بار یکسان، ضخامت طراحی شده لایه اساس و زیراساس با سرباره فولادی کمتر از سنگ‌دانه معمولی خواهد شد. آن‌ها نشان دادند که از سرباره‌های فولادی به دلیل داشتن وزن مخصوص بالا و سختی زیاد می‌توان در راه‌سازی استفاده نمود (۵). تحقیقات نادری در سال ۱۳۸۸ نشان داد که اضافه کردن سرباره دانه‌ای کوره بلند ذوب آهن اصفهان (GGBS) به خاک باعث کاهش تورم و افزایش مقاومت خاک می‌شود. هم‌چنین با افزایش درصد رطوبت نمونه‌ها، از تورم آن‌ها کاسته می‌شود (۶). به‌هاری^۴ (۲۰۱۳) جهت افزایش مقاومت و مشخصات مکانیکی سنگ آهک خردشده در لایه زیراساس از سرباره فولادی ناشی از کوره قوس الکتریکی استفاده نمود. او ثابت کرد که به‌کارگیری این سرباره‌ها باعث افزایش مشخصات مکانیکی مصالح مورد نظر می‌گردد (۷). ناگاتاک و همکاران^۵ (۲۰۰۴) ثابت کردند که یکی از روش‌های افزایش کیفیت مصالح بازیافتی ترکیب آن‌ها با مصالح مرغوب‌تر می‌باشد (۸). بلوری‌بزاز و زنجانی (۱۳۸۹) با استفاده از نتایج آزمایش CBR بر روی مصالح ترکیبی بازیافتی و مصالح مرغوب نشان دادند با افزودن حتی ۲۵٪ مصالح مرغوب، می‌توان CBR حالت ترکیبی را به مقدار چشم‌گیری افزایش داد (۹). یکی دیگر از روش‌های افزایش کیفیت مصالح بازیافتی، تثبیت این مصالح با مواد افزودنی مانند قیر، سیمان یا آهک است. در بسیاری از مناطق که کمبود مصالح مرغوب وجود داشته و یا تهیه آن هزینه بر 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 (۱۰). طی مطالعه‌ای ناتات‌مدجا و تان^۶ (۲۰۰۰) نشان دادند که با

3- Ameri & Behnood

4- Behiry

5- Nagatak, Gokce, Saeki & Hisada

6- Nataatmadja and Tan

1- National Slag Association

2- Motz & Geiseler

روش بررسی

جهت بررسی قابلیت استفاده مجدد از پسماندهای ساختمانی و صنعتی در لایه‌های راه ابتدا باید وضعیت فنی این مصالح با توجه به استانداردهای راه‌سازی را بررسی نمود. برای این منظور در این تحقیق از نخاله‌های حاصل از گودبرداری و تونل‌کنی شمال و مرکز تهران که در منطقه مشخصی از گود آب‌علی انباشته می‌شوند و نیز سرباره‌های فولادی حاصل از کوره قوس الکتریکی (EAF^۴) فولاد مبارکه اصفهان استفاده گردیده است. در صنایع ذوب‌آهن، سنگ معدن، سنگ آهک و کک به کوره ذوب‌آهن وارد می‌شوند. کک سوزانده شده و منواکسید کربن تولید می‌کند که موجب تبدیل سنگ‌آهن به آهن گداخته می‌شود. آهن گداخته با قالب‌ریزی تبدیل به محصولات فولادی می‌گردد. سرباره محصول فرعی غیرفلزی در این فرآیند است که مواد تشکیل دهنده آن عبارتند از سیلیکا، آلومیناسیلیکا و کلسیم‌سیلیکا (۱۴). شکل‌های (۱ و ۲) نمونه مصالح مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. علاوه بر دو نوع مصالح ذکر شده، یک نمونه به صورت ترکیبی از نخاله و سرباره‌های کارخانه فولاد نیز مورد بررسی قرار گرفت. در قسمت درشت‌دانه این نمونه از سرباره‌های فولادی که مقاومت بیشتری نسبت به نخاله دارند و در قسمت ریزدانه از نخاله‌های حاصل از گودبرداری جهت احراز شرایط یکپارچگی و چسبندگی سرباره استفاده گردید.

توجه به ماهیت آجر و بتن بازیافتی دانه‌بندی شده که دانه‌ای و فاقد مصالح ریزدانه چسبیده هستند، سیمان یکی از مناسب‌ترین مواد افزودنی به نظر می‌رسد (۱۱). لایت و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۱ بر روی رفتار مکانیکی نخاله‌های حاصل از ساخت و ساز آزمایشاتی انجام داده و به این نتیجه رسیدند که برای بالا بردن خواص چسبندگی این مصالح، سیمان باعث بهبود عملکرد چسبندگی این مصالح می‌شود (۱۲). بنرت و همکاران^۲ (۲۰۰۰) با انجام تحقیقات بر روی بتن بازیافتی جهت استفاده این مواد در لایه اساس و زیراساس راه ثابت کردند که ترکیبی از ۲۵٪ بتن‌های بازیافتی و ۷۵٪ درصد مصالح طبیعی، مشخصات لازم برای استفاده از این ترکیب در لایه اساس دانه‌ای را دارا می‌باشد (۱۳).

در این تحقیق سعی شده با توجه به مسایل زیست‌محیطی دفع نخاله‌های حاصل از گودبرداری و سرباره‌های کارخانه فولاد در طبیعت و نیز استخراج بیش از حد مصالح طبیعی، با انجام آزمایشات تعیین شده توسط آیین‌نامه روسازی بر روی نمونه‌های نخاله، سرباره و حالت ترکیبی این دو و مقایسه نتایج حاصل با استانداردهای راه‌سازی، امکان استفاده از این مصالح در لایه‌های اساس و زیراساس راه مورد بررسی قرار گیرد. سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP^۳) و با در نظرگیری معیارهای زیست‌محیطی، فنی، ارزانی و دسترسی، فواید زیست‌محیطی - اقتصادی کاربرد این مصالح در راه‌سازی ارزیابی گردد. مقایسه کاربرد نخاله‌های ساختمانی و سرباره‌های کارخانه فولاد به صورت مجزا و ترکیبی به عنوان مصالح جدید و کاربردی جهت استفاده در لایه‌های روسازی راه و کاربرد تحلیل سلسله مراتبی به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره از نوآوری‌های پژوهشی حاضر می‌باشد.

1- Leite, Motta, Vasconcelos & Bernucci

2- Bennert, Papp, Maher & Gucunski

3- Analytical Hierarchy Process

4- Electric Arc Furnace



شکل ۱- نمونه نخاله استفاده شده در تحقیق

Figure1. The debris samples used in the research



شکل ۲- سرباره‌های فولادی استفاده شده

Figure2. The steel slag samples used in the research

ارزیابی فنی مصالح

روی نخاله‌های حاصل از گودبرداری و مصالح ترکیبی انجام گردید.

آزمایش ارزش ماسه‌ای

آزمایش ارزش ماسه‌ای نسبت ماسه به ریزدانه‌ها (سیلت و رس) را در خاک تعیین می‌نماید. این پارامتر عاملی مهمی در عملیات خاکی و ساختمانی، زیرسازی راه‌ها، سدسازی و نیز ساخت بتن محسوب می‌شود. در آسفالت درصد بالای ریزدانه موجب مصرف بیش‌تر نیرو و در نتیجه سست‌شدن و وارفتن

جهت ارزیابی فنی مصالح مورد بررسی، با توجه به استانداردهای مورد نیاز مصالح مورد استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس راه، آزمایش‌های حد روانی و خمیری، ارزش ماسه‌ای، افت وزنی در برابر ضربه و سایش (لس آنجلس)، تراکم و CBR انجام پذیرفت. تمامی آزمایش‌ها به جز آزمایش‌های تراکم و CBR بر روی هر سه نوع مصالح تهیه‌شده شامل نخاله‌های حاصل از گودبرداری، سرباره‌های کارخانه فولاد و مصالح ترکیبی ساخته‌شده، صورت گرفته است. آزمایش‌های تراکم و CBR تنها بر

آزمایش CBR

نتایج آزمایش CBR معیاری برای تعیین ظرفیت باربری مصالح در راه‌سازی است. این آزمون در واقع جهت سنجش مقاومت مصالح کوچک تر از ۱۹ میلی‌متر در برابر بارهای وارده کاربرد دارد. در این آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا که به CBR موسوم است به عنوان معیاری از مقاومت خاک مورد آزمایش در مقایسه با یک مصالح استاندارد به دست می‌آید. طبق تعریف CBR یک خاک، نسبت نیروی لازم برای فرو بردن پیستونی به شکل، عمق و با سرعت مشخص در خاک مورد نظر به نیروی مورد نیاز برای فرو بردن همان پیستون در مصالح استاندارد می‌باشد.

آزمایش CBR معمولاً روی نمونه‌هایی انجام می‌شود که با درصد رطوبت بهینه متراکم شده باشند. تراکم خاک در استاندارد ASTM به دو روش آزمایش تراکم استاندارد (D 698) و آزمایش تراکم اصلاح شده (D 1557) انجام می‌شود (۱۷).

ارزیابی زیست‌محیطی اقتصادی با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

در علم تصمیم‌گیری که در آن انتخاب یک راهکار از بین راهکارهای موجود و یا اولویت‌بندی راهکارها مطرح است، چند سالی است که روش‌های تصمیم‌گیری با شاخص‌های چندگانه «MADM» جای خود را باز کرده‌اند. از این میان روش تحلیل سلسله‌مراتبی بیش از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از معروف‌ترین فنون تصمیم‌گیری چند منظوره است که اولین بار توسط توماس ساعتی^۲ در دهه ۱۹۷۰ ابداع گردید (۱۸). فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی منعکس‌کننده رفتار طبیعی و تفکر انسانی است. این روش، مسایل پیچیده را بر اساس آثار متقابل آن‌ها مورد بررسی قرار داده، آن‌ها را به شکلی ساده تبدیل کرده و به حل آن می‌پردازد (۱۹).

آسفالت زیر بارهای وارده می‌گردد. اصول آزمایش ارزش ماسه-ای به این ترتیب است که مقداری از نمونه موردنظر در استوانه مدرجی ریخته و به آن آب و مواد منعقدکننده اضافه می‌گردد. ماده منعقدکننده باعث می‌گردد که ذرات رس در محلول منعقد شده و معلق بمانند. پس از مدت معینی ارتفاع درشت دانه‌ها که ته‌نشین شده‌اند و ارتفاع تمام خاک در استوانه مدرج اندازه‌گیری می‌شود. نسبت این دو ارتفاع ارزش ماسه‌ای نامیده می‌شود (۱۵). این آزمایش با توجه به اهمیت نوع دانه‌بندی، نفوذپذیری، جذب آب، تورم و نشست در راه‌سازی، کاربرد فراوانی دارد.

آزمایش افت وزنی در برابر ضربه و سایش

آزمایش لس‌آنجلس به طور وسیعی برای تشخیص کیفیت نسبی و قابلیت مصالح سنگی در برابر ضربه و سایش به کار برده می‌شود. ماشین لس‌آنجلس یک استوانه فولادی دوار است که در آن تعداد مشخصی گلوله فولادی ریخته شده است. تعداد گلوله‌ها به دانه‌بندی نمونه مورد آزمایش بستگی دارد. هنگامی که استوانه می‌چرخد، یک پره، نمونه و گلوله‌ها را با خود به بالا می‌برد و از آن‌جا آن‌ها را به طرف مقابل استوانه می‌ریزد. به این ترتیب اثر ضربه و لهیدگی ایجاد می‌گردد. سپس محتوای استوانه ضمن ساییده شدن در داخل آن حرکت کرده تا بار دیگر به پره برخورد نموده و این چرخه تکرار گردد. بعد از چرخیدن استوانه به تعداد دوره‌های مشخص محتوای آن خارج شده و مصالح سنگی از الک عبور داده می‌شود تا درصدی که به صورت خاکه در آمده است، مشخص گردد (۱۶).

آزمایش تراکم

تراکم عبارتست از کاهش حجم خاک در اثر خارج ساختن هوا با استفاده از اعمال نیرو، در حالت وجود نیرو اصطکاک بین ذره‌ها بیشتر شده و وزن واحد آن افزایش می‌یابد. تراکم به منظور افزایش مقاومت نیروی برشی و کاهش نفوذپذیری صورت می‌پذیرد. نوع خاک، انرژی، رطوبت و دانه‌بندی مصالح عوامل موثر در نحوه تراکم آن مصالح می‌باشند.

از میان نرم افزارهای مورد استفاده در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی می توان به نرم افزار Expert choice اشاره نمود. این نرم افزار با دریافت داده های کیفی مانند آن چه در جدول (۱) مشاهده می شود و تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی بر روی آن -ها، بهترین گزینه را مشخص می نماید. نحوه کار با نرم افزار به این صورت است که ابتدا هدف از تحلیل را برای نرم افزار در قسمت مشخص شده تعریف نموده و سپس معیارهای تصمیم گیری که در تحقیق حاضر مسایل زیست محیطی، میزان دسترسی، ارزان بودن و مسایل فنی می باشد، مشخص می گردد. قدم بعدی مقایسه زوجی این معیارهاست. در این نرم افزار سه نوع مقایسه وجود دارد: ۱- اهمیت ۲- ارجحیت و به صورت عددی و ۳- درست نمایی. در این جا از مقایسه ارجحیت و به صورت عددی استفاده شده است. در این روش پنجره هایی برای مقایسه زوجی معیارهای مختلف با استفاده از جداول تکمیل شده توسط کارشناسان و بهره برداران، تکمیل گردید. با اتمام ساخت مدل، به نتایج دلخواه به صورت گرافیکی و هم چنین وزن و ترتیب اهمیت هر یک از معیارها دست خواهیم یافت.

معیارهای مطرح شده می توانند کمی و یا کیفی باشند. اساس این روش تصمیم گیری بر مقایسات زوجی پایه نهاده شده است. با فراهم آوردن درخت سلسله مراتبی تصمیم آغاز می شود. درخت سلسله مراتب تصمیم، عوامل مورد مقایسه و گزینه های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان داده و یک سری مقایسات زوجی انجام می دهد. این مقایسات وزن هر یک از عوامل را در راستای گزینه های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم نشان می دهد. در نهایت منطق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به گونه ای ماتریس های حاصل از مقایسات زوجی را با یکدیگر تلفیق ساخته تا تصمیم بهینه حاصل گردد (۲۰).

پس از ایجاد ساختار سلسله مراتبی اولویت عناصر در هر سطح تعیین می شود. مفاهیم مقیاس اندازه گیری در جدول (۱) ارائه شده است. این مقایسه ها ماتریسی تشکیل می دهند که درایه های آن از مقایسه عنصر هر سطر با عناصر ستون ها به دست می آید. به عنوان مثال درایه a_{12} نشان دهنده اهمیت عنصر اول نسبت به عنصر دوم است (۲۱). یکی از مزیت های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی امکان بررسی سازگاری در قضاوت های انجام شده برای تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارهاست، به عبارت دیگر تعیین این که در تشکیل ماتریس مقایسه دودویی معیارها، چه قدر سازگاری در قضاوت ها رعایت شده است. وقتی اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر برآورد می شود، احتمال ناهماهنگی در قضاوت ها وجود دارد. پس باید شاخصی را یافت که میزان ناهماهنگی داوری ها را نمایان سازد (۲۲). مکانیزمی که ساعتی برای بررسی ناسازگاری در قضاوت ها در نظر گرفته است، محاسبه ضریبی به نام ضریب ناسازگاری (IR^1) است (۲۳). چنان چه مقدار این ضریب کوچک تر یا مساوی ۰/۱ باشد، سازگاری در قضاوت ها مورد قبول است، در غیر این صورت باید در قضاوت ها تجدید نظر شود (۲۰).

جدول ۱- مقیاس Saaty برای اهمیت‌های نسبی جداول (۲۳)

Table1. Saaty scale for relative importance of Parameters

دو معیار سهم برابر برای هدف دارند	اهمیت برابر	۱
یکی کمی بیشتر از دیگری	کم اهمیت	۳
یکی قوی تر از دیگری	پراهمیت	۵
یکی قوی‌تر از دیگری و غلبه‌اش را در عمل نشان داده است.	بسیار پر اهمیت	۷
مطابق شواهد به طور قطع بسیار بیشتر از دیگری اهمیت دارد	فوق العاده پر اهمیت	۹
زمانی که بین دو مقدار قضاوت سخت باشد.	مقادیر بینابینی	۲و۴و۶و۸
زمانی که بین دو مقدار، معکوس تعریف فوق برقرار باشد.	معکوس مقادیر فوق	معکوس

یافته‌ها

های ساختمانی و مصالح ترکیبی به صورت دستی دانه‌بندی گردید. شکل (۳) الک‌های مورد استفاده جهت دانه‌بندی این مصالح را نشان می‌دهد.

ارزیابی فنی مصالح

دانه‌بندی

دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در لایه‌های راه‌سازی باید دارای پیوستگی باشد. علت این امر جلوگیری از نفوذ مواد ریزدانه خاک به بستر راه است. برای این منظور در این مطالعه نخاله-



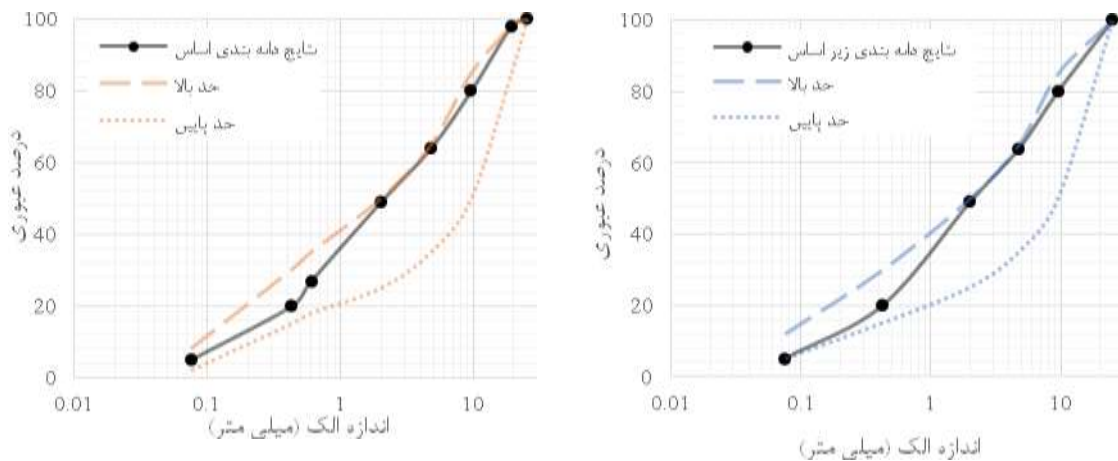
شکل ۳- الک‌های مورد استفاده جهت دانه‌بندی

Figure 3. Sieves used for aggregation

نخاله‌های حاصل از گودبرداری

بندی به صورت دستی در آزمایشگاه به نحوی که نمونه تهیه شده در محدوده‌های ۵ اساس و ۵ زیراساس قرارگیرد، آماده شده است.

شکل (۴) نمودار دانه‌بندی نخاله‌های حاصل از گودبرداری، برای لایه اساس و زیراساس را طبق دستور نشریه ۲۳۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران نشان می‌دهد (۲۴). این دانه-



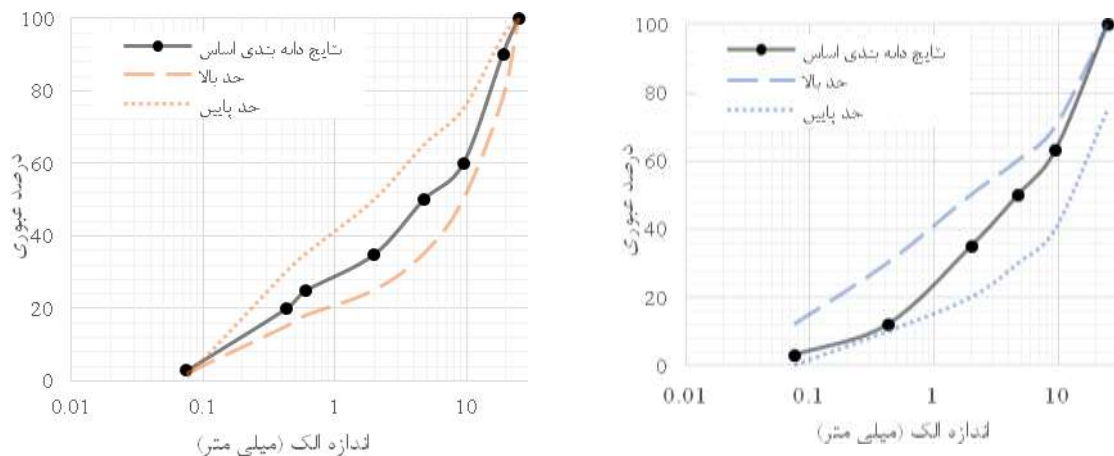
شکل ۴- نمودار دانه‌بندی نخاله برای لایه اساس و زیر اساس

Figure4. Grading of debris for base and subbase layers

مصالح ترکیبی

شرایط چسبندگی و یکپارچگی نمونه استفاده گردید. شکل (۵) نمودار دانه‌بندی نمونه در حالت ترکیبی نخاله و سرپاره ساخته شده در این تحقیق جهت استفاده در لایه اساس و زیراساس راه را نشان می‌دهد. براساس آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران این نمونه در محدوده ۵ اساس و ۲ زیراساس قرار می‌گیرد.

در دانه‌بندی حالت ترکیبی، جهت استفاده در لایه اساس و زیر اساس راه در قسمت درشت‌دانه از سرپاره‌های کارخانه فولاد (قسمت درشت‌دانه سرپاره که الک نمره ۴ تا الک ۱ اینچ را شامل می‌شود) که مقاومت بیشتری نسبت به نخاله‌های حاصل از گودبرداری دارد، استفاده شد. برای قسمت ریزدانه مصالح ترکیبی نیز از مصالح نخاله عبوری از الک نمره ۴ جهت احراز



شکل ۵- نمودار دانه‌بندی نمونه ترکیبی برای لایه اساس و زیر اساس

Figure5. Grading of mixed materials for base and subbase layers

حدود اتربرگ

آزمون انجام شده بر روی نخاله مورد بررسی نشان داد که این مصالح خاصیت خمیری ندارد. دلیل این امر کم بودن میزان

این آزمایش بر روی بخش مصالح ریزدانه رد شده از الک نمره ۴۰ طبق استاندارد ASTM D 4318 انجام گرفت (۲۵).



شکل ۶- نحوه قرائت عدد خاک و ماسه در آزمایش ارزش ماسه‌ای

Figure 6. The procedure of sand equivalent (SE) test

افت در برابر ضربه و سایش

ارزیابی مقاومت سنگ‌دانه‌ها در مقابل سایش، ضربه و خردشدگی توسط آزمایش لس آنجلس طبق استاندارد ASTM C 525 انجام گردید. برای این منظور مقدار ۲/۵ کیلوگرم از مصالح به‌جای مانده بر روی الک ۱/۲ و به همین میزان از مصالح به‌جای مانده بر روی الک ۳/۸ توزین و داخل دستگاه لس آنجلس ریخته شد. دستگاه روی تعداد دور ۵۰۰ با سرعت ۳۳ دور در ثانیه تنظیم گردید. سپس مصالح از الک نمره ۱۲ عبور داده شده و وزن عبوری مصالح محاسبه گردید. افت وزنی برای نخاله ۲۳ و برای سرباره ۱۷ درصد به‌دست آمد. سرباره به دلیل داشتن سنگ‌دانه‌های مقاوم‌تر سایش کمتری نسبت به نخاله دارد. آیین نامه روسازی آسفالتی ایران حداکثر میزان سایش استاندارد برای مصالح اساس را ۴۵ و زیر اساس را ۵۰ تعریف کرده که مصالح مورد بررسی این شرایط را احراز می‌نمایند.

رس موجود در بخش ریزدانه این مصالح می‌باشد. با توجه به مقادیر حد روانی و نشانه خمیری (مندرج در آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران) که به ترتیب نباید از ۲۵ و ۶ درصد افزون گردد، این مقادیر در محدوده مجاز قرار دارند.

دوام مصالح

دوام مصالح مورد استفاده در راه‌سازی در برابر شرایط محیطی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی مصالح می‌باشد. در این تحقیق نیز اثرات جبران ناپذیر شرایط نامساعد جوی چون یخبندان و حملات شیمیایی بر ساختار مصالح طبق استاندارد ASTM C88 ارزیابی گردید. آزمایش دوام بر روی مصالح دانه‌ای به صورت قرارگیری در معرض ۵ سیکل متوالی در محلول اشباع سولفات منیزیم به مدت ۱۸ ساعت و سپس خشک کردن مصالح در گرم‌خانه، انجام پذیرفت. در انتهای ۵ سیکل، افت وزنی به صورت مجزا برای مصالح ریزدانه و درشت‌دانه محاسبه گردید. نتایج آزمایش دوام بر روی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه نخاله به ترتیب ۳/۷ و ۶/۹ و برای مصالح ریزدانه و درشت‌دانه سرباره به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۴۸ به‌دست آمد. آیین نامه راه‌سازی آسفالتی ایران حداقل افت وزنی برای مصالح ریزدانه و درشت‌دانه در لایه اساس و زیراساس را ۱۲ تعیین کرده است.

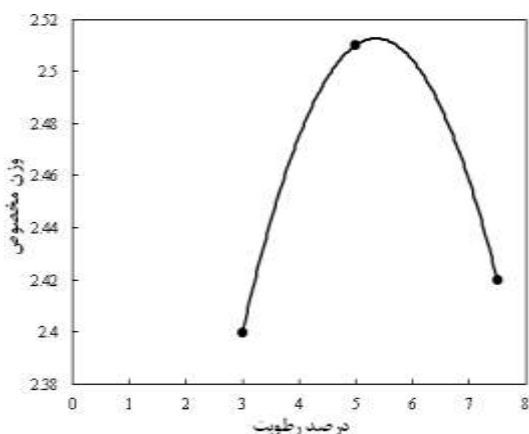
ارزش ماسه‌ای

نسبت ماسه به ریزدانه‌ها (سیلت و رس) از عوامل موثر در تعیین کیفیت خاک محسوب می‌گردد. بالابودن این نسبت در خاک باعث پایین آمدن درصد آب بهینه و رسیدن سریع‌تر خاک به حداکثر تراکم در زیرسازی راه‌ها می‌شود. با توجه به آزمایش ارزش ماسه‌ای مطابق استاندارد ASTM D2419 مقدار میانگین ۲۸/۵ به عنوان ارزش ماسه‌ای نخاله حاصل از گودبرداری مورد استفاده در این تحقیق به‌دست آمد. پایین بودن این پارامتر به دلیل شسته‌نشدن نمونه قبل از انجام آزمایش می‌باشد. مقدار ارزش ماسه‌ای پس از مقداری شسته شدن نمونه روی الک به ۹۱ تغییر یافت. حداقل ارزش ماسه‌ای تعیین شده برای لایه اساس و زیراساس طبق آیین نامه راه‌سازی آسفالتی ایران به ترتیب ۳۰ و ۴۰ می‌باشد. شکل (۶) نحوه قرائت عدد خاک و ماسه در آزمایش ارزش ماسه‌ای را نشان می‌دهد.

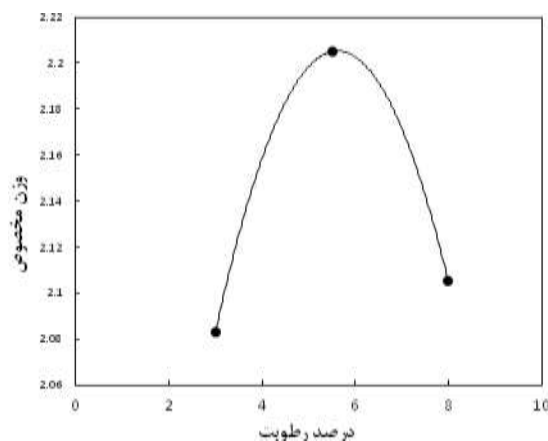
تراکم

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 بستگی دارد. به این منظور آزمایش تراکم براساس روش اصلاح شده D در شرایط ترافیک سنگین، تعداد ۵ لایه و هر لایه ۵۶ ضربه و مطابق استاندارد ASTM D1557 انجام پذیرفت. این آزمایش سه بار و با ۳ درصد رطوبت مختلف بر روی نخاله و مصالح ترکیبی (نخاله و سرباره) انجام شده و میزان رطوبت بهینه و

وزن مخصوص بیشینه محاسبه گردید. شکل (۷) نمودار تراکم نخاله و نمونه ترکیبی را نمایش می‌دهد. پس از برازش خط توسط سه نقطه و به دست آوردن معادله آن، برای نمونه نخاله رطوبت بهینه ۵/۶ درصد و وزن مخصوص حداکثر $\frac{2.51}{m^3}$ $\frac{gr}{m^3}$ و برای نمونه ترکیبی رطوبت بهینه ۵/۴ و وزن مخصوص حداکثر $\frac{2.13}{m^3}$ $\frac{gr}{m^3}$ حاصل شد.



(ب)



(الف)

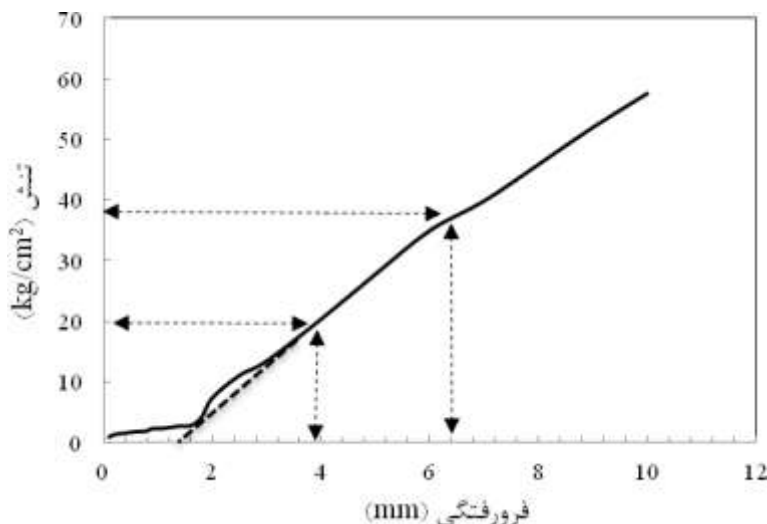
شکل ۷- نمودار تراکم الف) نخاله، ب) حالت ترکیبی

Figure 7. The compaction graph a) Debris, b) mixed materials

آزمایش CBR

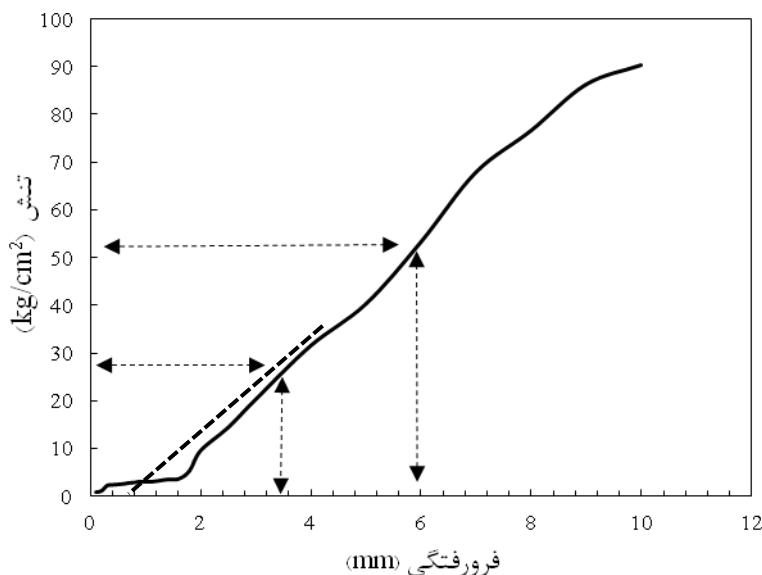
مشخصات لازم برای استفاده در لایه اساس دانه‌ای را دارا می‌باشد. شکل‌های (۸ و ۹) نمودار حاصل از آزمایش CBR بر روی نمونه نخاله و نمونه ترکیبی و نحوه تعیین عدد CBR را نمایش می‌دهند. در این منحنی‌ها مقادیر فشار روی محور عمودی و نفوذ روی محور افقی رسم می‌گردد. تنش نفوذی برحسب مگاپاسکال محاسبه شده است. در برخی از حالت‌ها به علت ناهمواری رویه‌ی آزمون بخش آغازین منحنی تنش - نفوذ کاو به سوی بالا ایجاد می‌گردد. در چنین مواقعی نقطه‌ی صفر چنانچه در شکل‌های (۸ و ۹) نشان داده شده است، اصلاح می‌گردد (۱۷).

در این تحقیق پس از به دست آوردن رطوبت بهینه برای تراکم صددرصد آزمایشگاهی، آزمایش CBR بر روی مصالح متراکم شده طبق استاندارد ASTM D 4429 انجام پذیرفت. عدد CBR برای نمونه نخاله در این تحقیق برابر ۳۶/۲ به دست آمد. بنابراین این مصالح براساس استاندارد موسسه آسفالت آمریکا در رده «خوب» برای استفاده در لایه‌های اساس و زیر اساس می‌باشد. همچنین نتیجه این آزمایش برای حالت ترکیبی ۵۰/۴ حاصل شد که در رده «عالی» برای استفاده در لایه اساس قرار می‌گیرد. مصالح طبیعی CBR بالاتری نسبت به مصالح مورد بررسی دارند. بنرت و همکاران در سال ۲۰۰۰ به این نتیجه رسیدند که ترکیبی از ۲۵٪ بتن بازیافتی و ۷۵٪ مصالح طبیعی



شکل ۸- نمودار حاصل از آزمایش CBR بر روی نمونه نخاله

Figure8. The CBR test on samples of debris



شکل ۹- نمودار حاصل از آزمایش CBR بر روی نمونه ترکیبی

Figure9. The CBR test on mixed materials

حاصل از گودبرداری شهر تهران و سرباره‌های کارخانه فولاد اصفهان را با استانداردهای راه‌سازی نشان می‌دهد.

در این تحقیق ارزیابی فنی کاربرد پسماندهای ساختمانی و صنعتی در راه‌سازی براساس آزمایش‌های انجام‌شده تعیین گردید. جدول (۲) مقایسه نتایج این تحقیق بر روی نخاله‌های

جدول ۲- مقایسه نتایج این تحقیق با مقادیر استاندارد

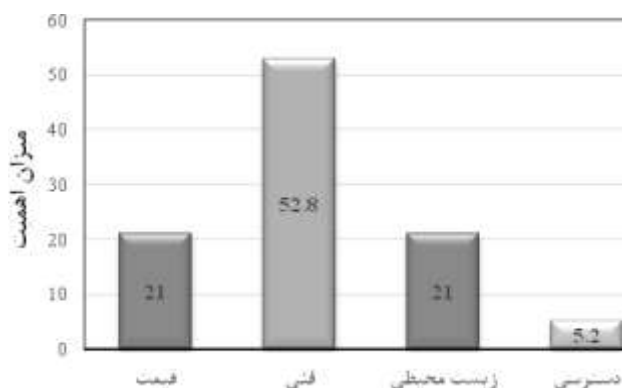
Table2. Comparison between the results of this research and standard values

استاندارد ASTM	نتایج تحقیق حاضر			نام آزمایش	
	ترکیبی	سرباره	نخاله		
>۱۲	-	۰/۳۱	۳/۷	درشتدانه	
		۰/۴۸	۶/۹	ریزدانه	
اساس: >۳۰ زیراساس: >۴۰	-	-	۲۸/۵	قبل از شسته شدن	
			۹۱	بعد از شسته شدن	
اساس: <۴۵ زیراساس: <۵۰	-	۱۷	۲۳	افت در برابر ضربه و سایش	
-	۵/۴	-	۵/۶	رطوبت بهینه	
-	۲/۵۱۳		۲/۲۰۷	وزن مخصوص حداکثر	
نخاله: "خوب" ترکیبی: "عالی"	۵۰/۴	-	۳۶/۲	CBR	
<۲۵	عدم وجود خاصیت خمیری به دلیل کم بودن ریزدانه			حد روانی	
<۶				نشانه خمیری	

اداره مدیریت پسماند و شرکت ریوا تحقیق که یک شرکت تخصصی در زمینه سرباره است تکمیل گردید. از این نظرات میانگین گیری شده و به اعدادی نزدیک با ناسازگاری کمتر گرد شدند. شکل (۱۰) میزان اهمیت عوامل مختلف موثر در انتخاب مصالح مناسب در راه سازی را با نظر کارشناسان مربوطه نشان می دهد. پس از آن با تعیین امتیاز هر کدام از مصالح مورد استفاده در این تحقیق نسبت به عوامل مختلف زیست محیطی، مسایل فنی، ارزانی و میزان دسترسی اطلاعات ورودی به نرم افزار تکمیل می گردد. امتیاز مسایل فنی با توجه به نتایج آزمایش ها، مسایل زیست محیطی با نظر مستقیم کارشناسان و میزان دسترسی و قیمت مصالح براساس نظر کارشناسان با در نظر گیری وضعیت بازار مصالح تعیین می شوند.

ارزیابی زیست محیطی - اقتصادی و انتخاب مصالح بهینه با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی

در این تحقیق جهت شناسایی میزان قابل اعتماد بودن هر یک از مصالح از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده است. اساس کار این روش بر استفاده از نظر کارشناسان در مسایل کیفی و نتایج آزمایش ها در مسایل کمی استوار است. در این جا با لحاظ نمودن مهم ترین عوامل از جمله پارامترهای زیست محیطی، فنی، دسترسی و ارزانی و استفاده از نرم افزار Expert choice که یک نرم افزار تخصصی در این زمینه است، این تحلیل صورت پذیرفته است. بدین صورت که میزان اهمیت هر یک از عوامل ذکر شده نسبت به یکدیگر با نظر کارشناسان اخذ و با امتیازدهی مرتبط، اطلاعات ورودی به نرم افزار داده شد. پرسش نامه های تدوین شده توسط پنج نفر از کارشناسان

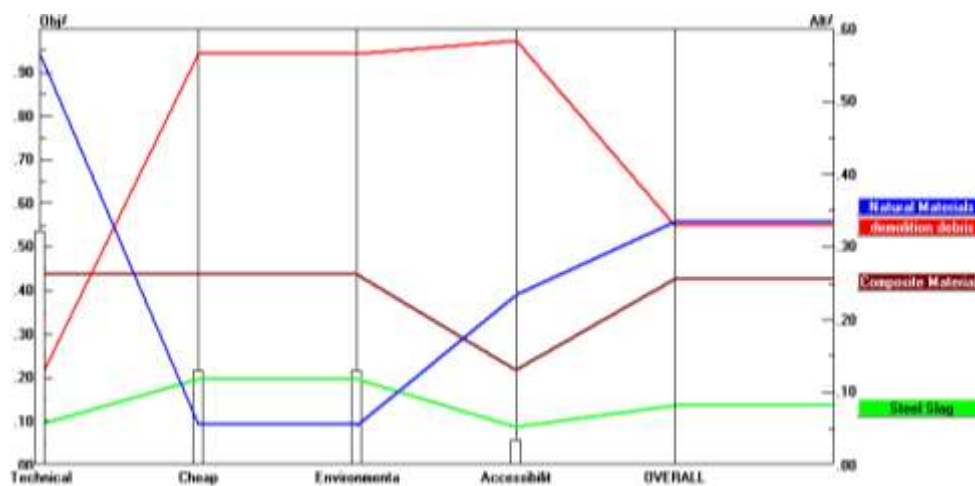


شکل ۱۰- میزان اهمیت عوامل موثر در مصالح بهینه با نظر کارشناسان

Figure 10. The importance of factors affecting the optimal materials according to experts

وضعیت مطلوبی داشته، درحالی که از نقطه نظر مسایل زیست- محیطی و میزان قیمت امتیاز پایینی را کسب کرده است. نرم- افزار Expert choice قابلیت بیان اطلاعات با نمایش‌های گرافیکی مختلفی را دارا می‌باشد. یکی از این نمایش‌ها، پنجره مقایسه دودویی مصالح مختلف با یکدیگر نسبت به یکی از عوامل تاثیرگذار در تصمیم‌گیری می‌باشد.

شکل (۱۱) برتری و ضعف مصالح موردنظر در معیارهای مختلف را نسبت به هم‌دیگر که خلاصه‌ای از اطلاعات برگرفته از پرسش‌نامه‌ها و ورودی به نرم‌افزار می‌باشد، نشان می‌دهد. به عنوان مثال در این نمودار رنگ آبی نشان‌دهنده وضعیت مصالح طبیعی می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مصالح طبیعی از نظر ویژگی‌های فنی جایگاه بسیار خوب و از نظر دسترسی



شکل ۱۱- برتری و ضعف مصالح موردنظر در معیارهای مختلف نسبت به هم‌دیگر

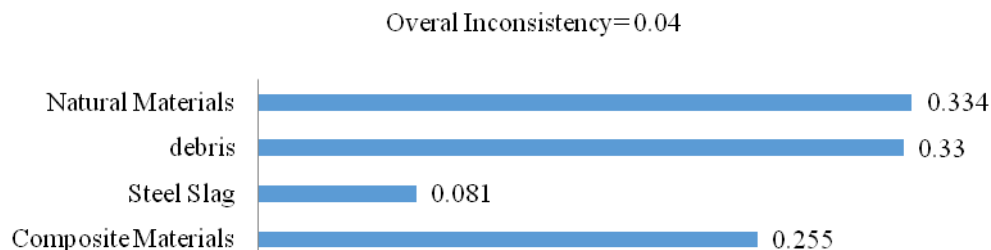
Figure 11. The advantages and disadvantages of the different materials according to various criteria

مناسب در راه‌سازی از جمله مسایل زیست‌محیطی، مشخصات فنی، ارزانی مصالح و نحوه دسترسی و با اعمال میزان اهمیت هر یک از این پارامترها، مصالح طبیعی با وزن ۰/۳۳۴ و نخاله- های حاصل از گودبرداری با وزن ۰/۳۳۰ مناسب‌ترین مصالح

در انتها شکل (۱۲) پنجره آنالیز نهایی مصالح را نشان می‌دهد. عدد ناسازگاری برابر ۰/۰۴ بوده که نمایان‌گر منطقی بودن داده‌های ورودی به نرم‌افزار می‌باشد. با توجه به این شکل، با در نظرگیری تمامی پارامترهای تاثیرگذار در انتخاب مصالح

دهنده مناسب بودن این مصالح جهت استفاده در راهسازی با در نظرگیری تمامی عوامل ذکر شده می باشد.

در راهسازی انتخاب می گردند. نزدیک بودن وزن خروجی نرم- افزار Expert choice برای نخاله های حاصل از گودبرداری و نیز مصالح ترکیبی ساخته شده از نخاله و سرباره فولادی، نشان-



شکل ۱۲- پنجره آنالیز نهایی مصالح

Figure 12. The final analysis graph of materials

بحث و نتیجه گیری

مراتبی با نرم افزار Expert choice با توجه به تمامی پارامترهای تاثیرگذار در انتخاب مصالح مناسب از جمله مشخصات فنی، مسایل زیست محیطی، ارزانی مصالح و نحوه دسترسی و با اعمال میزان اهمیت هر یک از این پارامترها، قابلیت کاربرد هر یک از مصالح جهت استفاده در لایه های مختلف راه تعیین گردید. با توجه به نظر کارشناسان پس از مسایل فنی، قیمت و موضوعات زیست محیطی از اهمیت بالایی در تصمیم گیری جهت انتخاب مصالح برتر برخوردار بوده اند. نتایج این تحلیل نشان داد که نخاله های حاصل از گودبرداری مناطق مورد نظر دارای شرایط مشابهی با مصالح طبیعی برای استفاده در راهسازی می باشند. استفاده از مصالح ترکیبی نیز به دلیل ایجاد توانایی استفاده از سرباره های فولادی در لایه اساس و زیر اساس با توجه به شرایط زیست محیطی مناسب می باشد.

علاوه بر مشخصات فنی مطلوب حالت ترکیبی دو مصالح برای استفاده در لایه های مورد نظر راهسازی، استفاده و بازیابی این محصولات به عنوان سنگ دانه در بخش های مختلف مهندسی عمران، باعث جلوگیری از برداشت سنگ دانه های معمولی و تخریب محیط زیست و اثرات احتمالی ناشی از دپوی این مواد در فضاهای آزاد خواهد شد.

در این تحقیق سعی گردید استفاده از پسماندهای ساختمانی و صنعتی در لایه های مختلف راه با توجه به استانداردهای موجود راهسازی و همچنین نظر کارشناسان و مسایل زیست محیطی امکان سنجی گردد. برای این منظور ابتدا با انجام آزمایش های مورد نیاز بر روی سه نمونه ساخته شده با استفاده از نخاله های حاصل از گودبرداری شهر تهران، سرباره های فولادی کوره قوس الکتریکی کارخانه فولاد اصفهان و نیز نمونه ترکیبی ساخته شده از این دو و با لحاظ کردن دانه بندی مناسب، کیفیت این مصالح جهت استفاده در راهسازی با استانداردهای ASTM مقایسه گردید. نتیجه آزمایش مقاومت در برابر ضربه و سایش برای نخاله های حاصل از گودبرداری ۲۳ و مقدار CBR برای این مصالح ۳۶/۲ به دست آمد که از این حیث در رده خوب برای لایه های روسازی راه قرار می گیرد. همچنین ارزش ماسه ای این مصالح پس از شسته شدن برای استفاده در هر دو لایه اساس و زیراساس مناسب ارزیابی گردید. مقدار CBR محاسبه شده برای مصالح ترکیبی ساخته شده از نخاله و سرباره ۵۰/۴ برآورد شد که نشان دهنده قدرت باربری بالای این مصالح و مناسب بودن آن جهت استفاده در لایه اساس می باشد.

پس از اتخاذ تصمیم مناسب در حیطه مسایل فنی، استفاده از این پسماندها در راهسازی با استفاده از روش تحلیل سلسله

mixtures as subbase material in flexible pavement. *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, March, pp. 43-53.

8. Nagatak, S., Gokce, A., Saeki, T., & Hisada. M. (2004). Assessment of Recycling Process Induced Damage Sensitivity of Recycled Concrete Aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34, June, 965-971.

۹. بلوری بزاز، جعفر و زنجانی. محمدمهدی، ۱۳۸۹.

بررسی مقاومت مصالح حاصل از بازیافت نخاله‌های ساختمانی جهت استفاده در لایه‌های روسازی، پژوهش‌نامه حمل و نقل، ۷(۲)، صص ۹۱-۸۱.

۱۰. مرنندی. سید مرتضی و صفاپور. پروین، ۱۳۸۵، تثبیت لایه اساس با استفاده از تکنولوژی نوین سیمان و امولسیون (مطالعه موردی احداث راه اصلی دوغارون - هرات افغانستان)، پژوهش‌نامه حمل و نقل، ۳(۲)، صص ۱۳۸-۱۲۳.

11. Nataatmadja, A., & Tan, Y. L., 2000. The performance of recycled crushed concrete aggregates. Proceedings of the 5th. International Symposium on Unbound Aggregates in Road Construction, A. R. Dawson (ed.), Nottingham, U.K.

12. Leite, F. C., Motta, R. S., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L., 2011. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, vol. 25, June, pp. 2972-2979.

13. Bennert, T., Papp, W.J., Maher, A., & Gucunski, N., 2000. Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase application. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1714, January, pp. 33-39.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از آقایان مهندس سعادت و بختیاری (کارشناسان آزمایشگاه ژئوتکنیک و بتن گروه مهندسی عمران دانشگاه خوارزمی) و جناب آقای مهندس اشکوب و آزمایشگاه یکتا آزمون ایرانیان به دلیل قبول انجام برخی از آزمایش‌ها در این آزمایشگاه، کمال تشکر را داشته باشند.

منابع

۱. وائقی. محبوبه، ۱۳۸۶، خواص و مشخصات سرباره فولاد آلیاژی و کاربردهای سرامیکی آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی مواد سرامیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
2. NSA Steel Slag, 2001. A Premier Construction Aggregate.
3. Motz., H., & Geiseler, J., 2001. Products of steel slags and opportunity to save natural resources”, *Waste Management*, vol. 21(3), pp. 285-293.
4. Wu, S., Xue, Y., Ye, Q. & Chen, Y., 2007. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, vol. 42, July, pp. 2580-2585.
5. Ameri, M., & Behnood, A., 2012. Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates. *Construction and Building Materials*, January, pp. 475-480.
۶. نادری. حسین، ۱۳۸۸، تاثیر سرباره دانه‌ای کوره بلند ذوب آهن اصفهان بر مقاومت و خصوصیات تورمی خاک رس تثبیت شده با آهک در مجاورت سولفات، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا.
7. Behiry, A. E., 2013. Evaluation of steel slag and crushed limestone

- industry in Taiwan. *Expert Systems with Applications*, vol. 34, January, pp. 96-107.
۲۱. توفیق. فیروز، ۱۳۷۲، ارزشیابی چندمعیاری در طرح ریزی کالبدی، *مجله آبادی*، شماره ۱۱، صص ۴۰-۴۳.
۲۲. زبردست. اسفندیار، ۱۳۸۰، کاربرد فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در برنامه ریزی شهری و منطقه‌ای، *نشریه هنرهای زیبا*، شماره ۱۰، صص ۲۱-۱۳.
23. Saaty, T. L., 2000. *Fundamentals of decision making and priority theory*. RWS Publications, England.
۲۴. آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ۱۳۸۱، نشریه ۲۳۴، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.
25. Bowles, J. E., 1992. *Engineering properties of soil and their measurement*. Fourth Edition, New York Mc Graw-Hill.
14. Seggiani, M., 2003. Recovery of silica gel from blast furnace slag, *Resources, Conservation and recycling*, vol. 40, No. 1, pp. 71-80.
۱۵. بازیار. محمد حسن و صالح زاده. حسین، «آزمایشگاه مکانیک خاک»، چاپ هفتم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۰.
16. ASTM C535:2003, Test Method for resistance to Degradation for Large size coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
17. ASTM D 4429 Test Method for CBR (California Bearing Ratios) of Soils in Place.
۱۸. قدسی‌پور. سید حسن، «مباحثی در تصمیم‌گیری چند معیاره»، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه امیر کبیر، ۱۳۸۱.
19. Saaty, T. L., 1980. *The analytic hierarchy process: Planning, Priority setting, resource allocation*, 1st Ed., McGraw – Hill, New York.
20. Lee, A. H. I., Chen, W. C., & Chang, C. J., 2008. A fuzzy AHP and BSC approach for evaluating performance of IT department in the manufacturing

