Archive of SID

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره نوزدهم، شماره دو، تابستان ۹۶

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

محمد دلنواز [*1]

delnavaz@khu.ac.ir

حسین حسن‌پور انزابی [۲]

حسین زنگویی [۲]

تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۱۶ **تاریخ پذیرش:۹۴/۱۱/۱۲**

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 این-رو 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[۳] 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 ۳۶/۲ 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 مطلوب‌بودن 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

www.SID.ir

Archive of SID

J.Env. Sci. Tech., Vol 19, No.2, summer, 2017

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 Hasanpour[2]
Hossein Zangooei[2]

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, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Kharazmi University, Tehran- Iran. *(Corresponding Author)
2- MSc Student in Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Kharazmi Uneversity, Tehran- Iran.

www.SID.ir

Archive of SID

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 دانه‌ای سرباره برای عملیات راه‌سازی استفاده می‌شده است (۲). انجمن ملی سرباره[1] 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[2] (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). آمری و بهنود[3] (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). بهایری[4] (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[5] (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 ناتات‌مادجا و تان[6] (۲۰۰۰) نشان دادند که با

1- National Slag Association
2- Motz & Geiseler

3- Ameri & Behnood
4- Behiry
5- Nagatak, Gokce, Saeki & Hisada
6- Nataatmadja and Tan

www.SID.ir

Archive of SID

توجه به ماهیت آجر و بتن بازیافتی دانه‌بندی شده که دانه‌ای و فاقد مصالح ریزدانه چسبنده هستند، سیمان یکی از مناسب-ترین مواد افزودنی به نظر می‌رسد (۱۱). لایت و همکاران[1] 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[2] (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 نمونه-های 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[3]) و با درنظرگیری معیارهای زیست‌محیطی، فنی، ارزانی و دسترسی، فواید زیست‌محیطی- اقتصادی کاربرد این مصالح در راه‌سازی ارزیابی گردد. مقایسه کاربرد نخاله‌های ساختمانی و سرباره‌های کارخانه فولاد به‌صورت 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.

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[4]) 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 می-شود. 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 ذکرشده، یک نمونه به‌صورت 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.

1- Leite, Motta, Vasconcelos & Bernucci
2- Bennert, Papp, Maher & Gucunski
3- Analytical Hierarchy Process
4- Electric Arc Furnace

www.SID.ir

Archive of SID

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

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 (لس‌آنجلس)، 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 ساخته-شده، صورت گرفته است. آزمایش‌های تراکم و CBR تنها بر 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

www.SID.ir

Archive of SID

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 گلوله ها 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 دورهای 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.

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 به‌دست می‌آید. طبق تعریف CBR یک خاک، نسبت نیروی لازم برای فروبردن 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 سلسله مراتبی (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[1]» جای خود را باز کرده‌اند. از این میان روش تحلیل سلسله مراتبی بیش از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از معروف‌ترین فنون تصمیم‌گیری چند منظوره است که اولین بار توسط توماس ساعتی[2] 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).

1- Multi Alternative Decision Making
2- Saaty

www.SID.ir

Archive of SID

معیارهای مطرح شده می‌توانند کمی و یا کیفی باشند. اساس این روش تصمیم‌گیری بر مقایسات زوجی پایه نهاده شده است. با فراهم‌آوردن درخت سلسله‌مراتبی تصمیم آغاز می‌شود. درخت سلسله مراتب تصمیم، عوامل مورد مقایسه و گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان داده و یک سری مقایسات زوجی انجام می‌دهد. این مقایسات وزن هر یک از عوامل را در راستای گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم نشان می‌دهد. در نهایت منطق فرآیند تحلیل سلسل مراتبی به گونه‌ای ماتریس‌های 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 می‌شود. مفاهیم مقیاس اندازه‌گیری در جدول (۱) ارایه شده است. این مقایسه‌ها ماتریسی تشکیل می‌دهند که درایه-های آن از مقایسه عنصر هر سطر با عناصر ستون‌ها به‌دست می‌آید. به عنوان مثال درایه a_{12} نشان‌دهنده اهمیت عنصر اول نسبت به عنصر دوم است (۲۱). یکی از مزیت‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی امکان بررسی سازگاری در قضاوت‌های انجام شده برای تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارهاست، به عبارت دیگر تعیین این که در تشکیل ماتریس مقایسه دودویی معیارها، چه‌قدر سازگاری در قضاوت‌ها رعایت شده است. وقتی اهمیت معیارها نسبت به یک‌دیگر برآورد می‌شود، احتمال ناهماهنگی در قضاوت‌ها وجود دارد. پس باید شاخصی را یافت که میزان ناهماهنگی داوری‌ها را نمایان سازد (۲۲). مکانیزمی که ساعتی برای بررسی ناسازگاری در قضاوت‌ها در نظر گرفته است، محاسبه ضریبی به نام ضریب ناسازگاری (IR^{1}) است (۲۳). چنان‌چه مقدار این ضریب کوچک تر یا مساوی ۰/۱ باشد، سازگاری در قضاوت‌ها مورد قبول است، در غیر این‌صورت باید در قضاوت‌ها تجدید نظر شود (۲۰).

از میان نرم‌افزارهای مورد استفاده در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی می‌توان به نرم افزار Expert choice اشاره نمود. این نرم‌افزار با دریافت داده‌های کیفی مانند آن‌چه در جدول (۱) مشاهده می‌شود و تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی بر روی آن-ها، بهترین گزینه را مشخص می‌نماید. نحوه کار با نرم‌افزار به این صورت است که ابتدا هدف از تحلیل را برای نرم‌افزار 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 می‌باشد، مشخص می‌گردد. قدم بعدی مقایسه زوجی این معیارهاست. در این نرم‌افزار سه نوع مقایسه وجود دارد: ۱- اهمیت ۲- ارجحیت و به صورت عددی و ۳- درستنمایی. در این‌جا از مقایسه ارجحیت و به صورت عددی استفاده شده است. در این روش پنجره‌هایی برای مقایسه زوجی معیارهای مختلف با استفاده از جداول تکمیل شده توسط کارشناسان و بهره‌برداران، تکمیل گردید. با اتمام ساخت مدل، به نتایج دلخواه به صورت گرافیکی و هم‌چنین وزن و ترتیب اهمیت هر یک از معیارها دست خواهیم یافت.

1- Incompatibility Ratio

www.SID.ir

Archive of SID

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

Table1. Saaty scale for relative importance of Parameters

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

یافته‌ها

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

شکل ۳- الک‌های مورداستفاده جهت دانه‌بندی

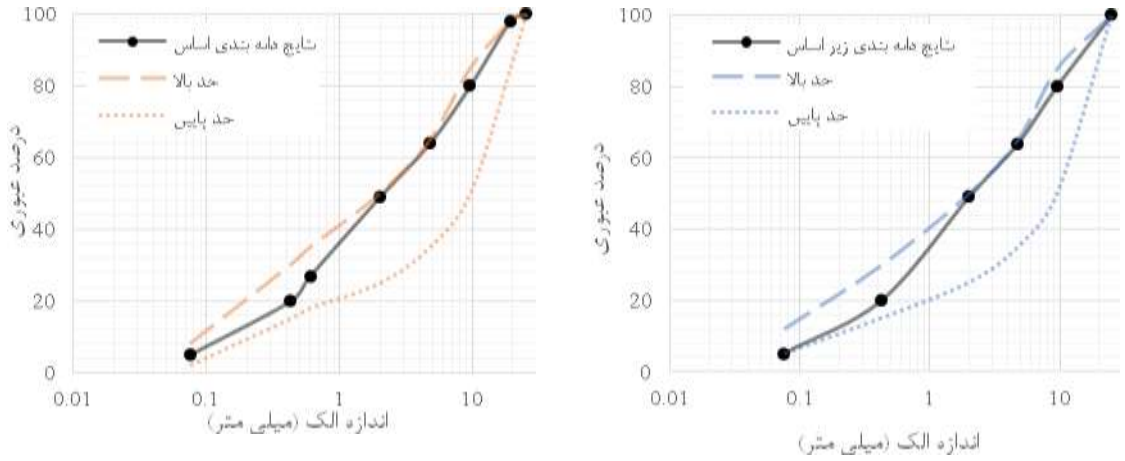
Figure 3. Sieves used for aggregation

نخاله‌های حاصل از گودبرداری

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-بندی به‌صورت دستی در آزمایشگاه به‌نحوی که نمونه تهیه‌شده در محدوده‌های ۵ اساس و ۵ زیراساس قرارگیرد، آماده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

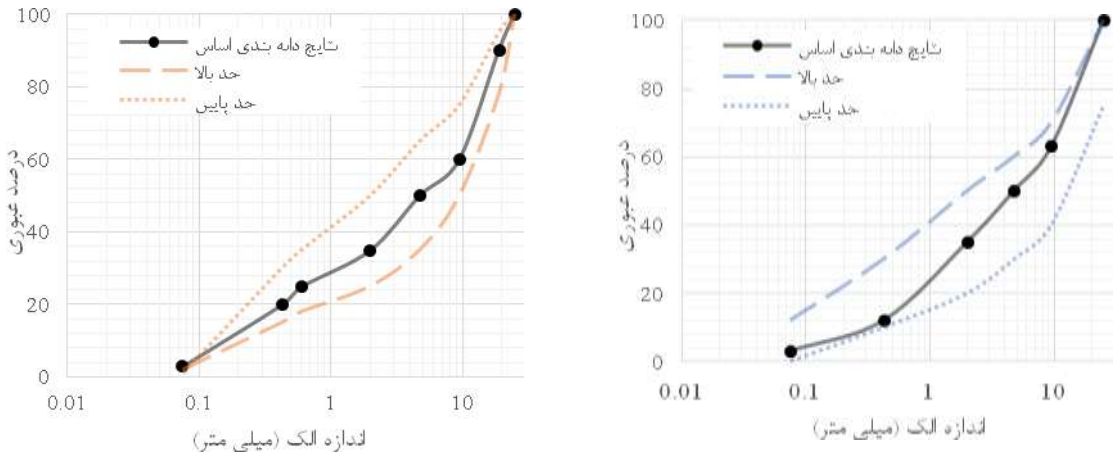


شکل ۴- نمودار دانه‌بندی نخاله برای لایه اساس و زیر اساس

Figure4. Grading of debris for base and subbase layers

مصالح ترکیبی

در دانه‌بندی حالت ترکیبی، جهت استفاده در لایه اساس و زیر-اساس راه در قسمت درشت‌دانه از سرباره‌های کارخانه فولاد (قسمت درشت‌دانه سرباره 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 شرایط چسبندگی و یکپارچگی نمونه استفاده گردید. شکل (۵) نمودار دانه‌بندی نمونه در حالت ترکیبی نخاله و سرباره 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 می-گیرد.



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

Figure5. Grading of mixed materials for base and subbase layers

حدود اتربرگ

این آزمایش بر روی بخش مصالح ریزدانه رد شده از الک نمره ۴۰ طبق استاندارد ASTM D 4318 انجام گرفت (۲۵). آزمون انجام شده بر روی نخاله مورد بررسی نشان داد که این مصالح خاصیت خمیری ندارد. دلیل این امر کم بودن میزان

www.SID.ir

Archive of SID

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 به‌صورت قرارگیری در معرض ۵ سیکل متوالی در محلول اشباع سولفات منیزیم به مدت ۱۸ ساعت و سپس خشک‌کردن 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 D2419مقدار میانگین ۲۸/۵ به عنوان ارزش ماسه‌ای نخاله حاصل از گودبرداری مورد استفاده در این تحقیق به‌دست آمد. پایین بودن این پارامتر به‌دلیل شسته‌نشدن نمونه قبل از انجام آزمایش می‌باشد. مقدار ارزش ماسه‌ای پس از مقداری شسته‌شدن 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.

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

Figure6. The procedure of sand equivalent (SE) test

افت در برابر ضربه و سایش

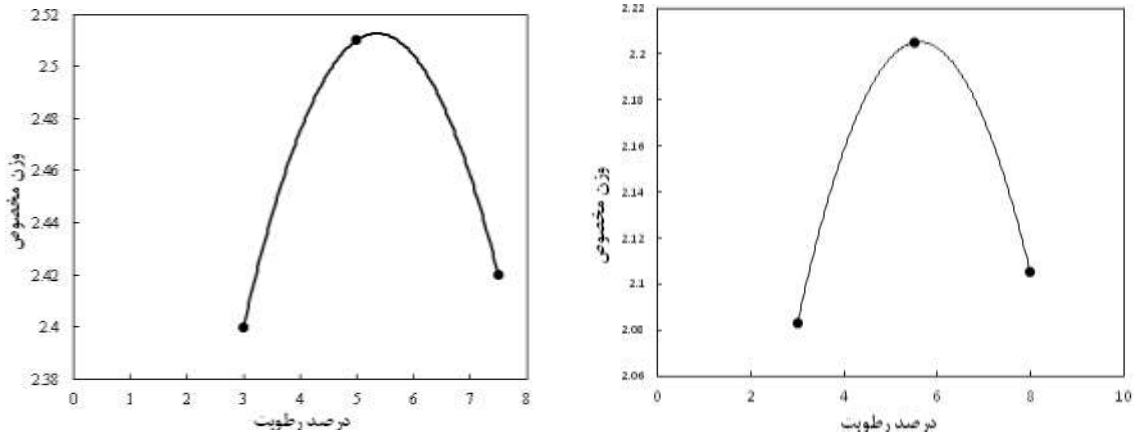
ارزیابی مقاومت سنگ‌دانه‌ها در مقابل سایش، ضربه و خردشدگی توسط آزمایش لس آنجلس طبق استاندارد ASTCM C 525 انجام گردید. برای این منظور مقدار ۲/۵ کیلوگرم از مصالح به‌جای مانده بر روی الک ۱/۲ و به همین میزان از مصالح به‌جای مانده بر روی الک ۳/۸ توزین و داخل دستگاه لس‌آنجلس ریخته شد. دستگاه روی تعداد دور ۵۰۰ با سرعت ۳۳ دور در ثانیه تنظیم گردید. سپس مصالح از الک نمره ۱۲ عبورداده 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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 ضرب و مطابق استاندارد ASTM D1557 انجام پذیرفت. این آزمایش سه‌بار 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 به‌دست آوردن معادله آن، برای نمونه نخاله رطوبت بهینه ۵/۶ درصد و وزن مخصوص حداکثر ۲/۲۰۷ $\frac{gr}{m^3}$ و برای نمونه ترکیبی رطوبت بهینه ۵/۴ و وزن مخصوص حداکثر ۲/۵۱۳ $\frac{gr}{m^3}$ حاصل شد.



الف) ب)

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

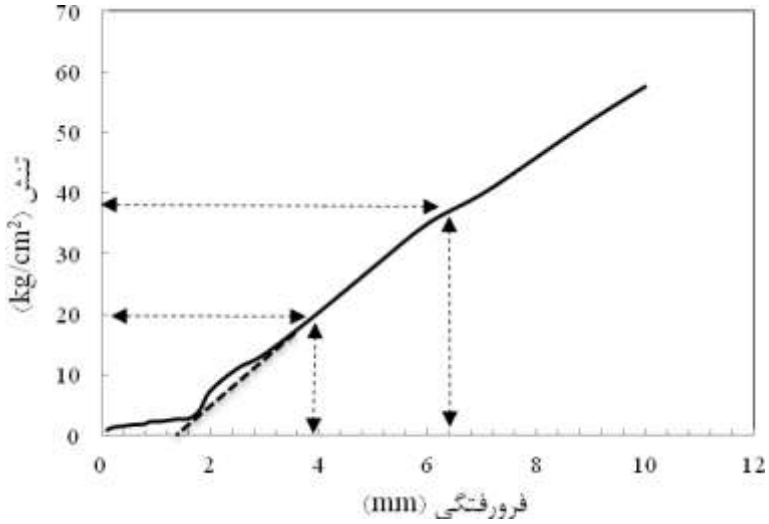
Figure7. The compaction graph a) Debris, b) mixed materials

آزمایش CBR

در این تحقیق پس از به‌دست 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 به‌دست 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 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 آزمونه بخش آغازین منحنی تنش - نفوذ کاو به سوی بالا ایجاد می‌گردد. در چنین مواقعی نقطه‌ی صفر چنان چه در شکل‌های (۸ و ۹) نشان داده شده است، اصلاح می‌گردد (۱۷).

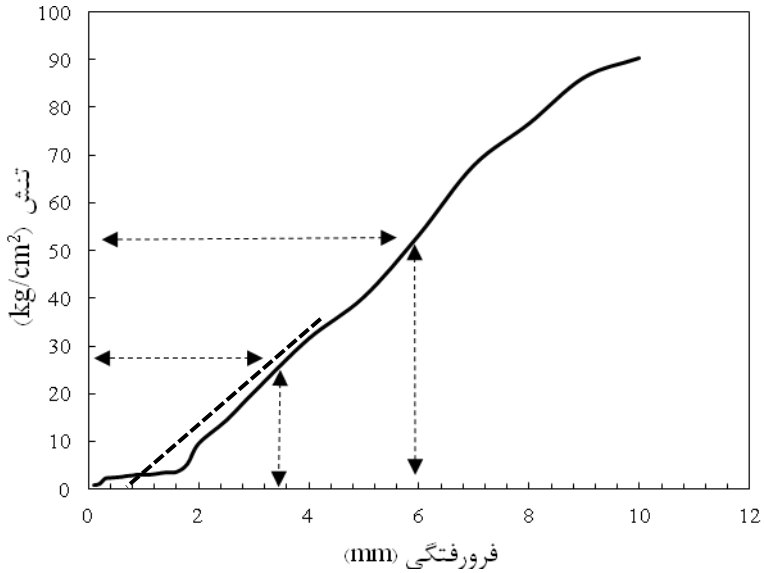
www.SID.ir

Archive of SID



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

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

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲- مقایسه نتایج این تحقیق با مقادیر استاندارد

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

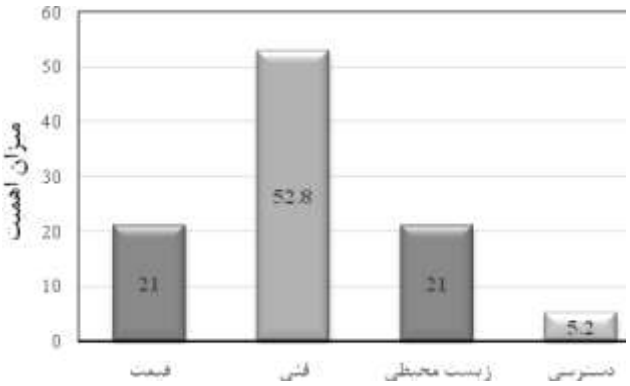
نام آزمایش		نتایج تحقیق حاضر			استاندارد ASTM
		نخاله	سرباره	ترکیبی	
دوام	درشت‌دانه	۳/۷	۰/۳۱	-	>۱۲
	ریزدانه	۶/۹	۰/۴۸		
ارزش ماسه‌ای	قبل از شسته‌شدن	۲۸/۵	-	-	اساس: >۳۰ زیراساس: >۴۰
	بعد از شسته‌شدن	۹۱			
افت در برابر ضربه و سایش		۲۳	۱۷	-	اساس: <۴۵ زیراساس: <۵۰
تراکم	رطوبت بهینه	۵/۶	-	۵/۴	-
	وزن مخصوص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

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

در این تحقیق جهت شناسایی میزان قابل اعتمادبودن هر یک از مصالح از تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است. اساس کار این روش بر استفاده از نظر کارشناسان در مسایل کیفی و نتایج آزمایش‌ها در مسایل کمی استوار است. در این-جا با لحاظ نمودن مهم‌ترین عوامل از جمله پارامترهای زیست محیطی، فنی، دسترسی و ارزانی و استفاده از نرم‌افزار 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 نرم‌افزار داده شد. پرسش‌نامه‌های تدوین شده توسط پنج نفر از کارشناسان اداره مدیریت پسماند و شرکت ریوا تحقیق که یک شرکت تخصصی در زمینه سرباره است تکمیل گردید. از این نظرات میانگین‌گیری شده و به اعدادی نزدیک با ناسازگاری کمتر گرد شدند. شکل (۱۰) میزان اهمیت عوامل مختلف موثر در انتخاب مصالح مناسب در راه‌سازی را با نظر کارشناسان مربوطه نشان می‌دهد. پس از آن با تعیین امتیاز هر کدام از مصالح مورد استفاده در این تحقیق نسبت به عوامل مختلف زیست‌محیطی، مسایل فنی، ارزانی و میزان دسترسی اطلاعات ورودی به نرم-افزارتکمیل می‌گردد. امتیاز مسایل فنی با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مسایل زیست‌محیطی با نظر مستقیم کارشناسان و میزان دسترسی و قیمت مصالح براساس نظر کارشناسان با درنظرگیری وضعیت بازار مصالح تعیین می‌شوند.

www.SID.ir

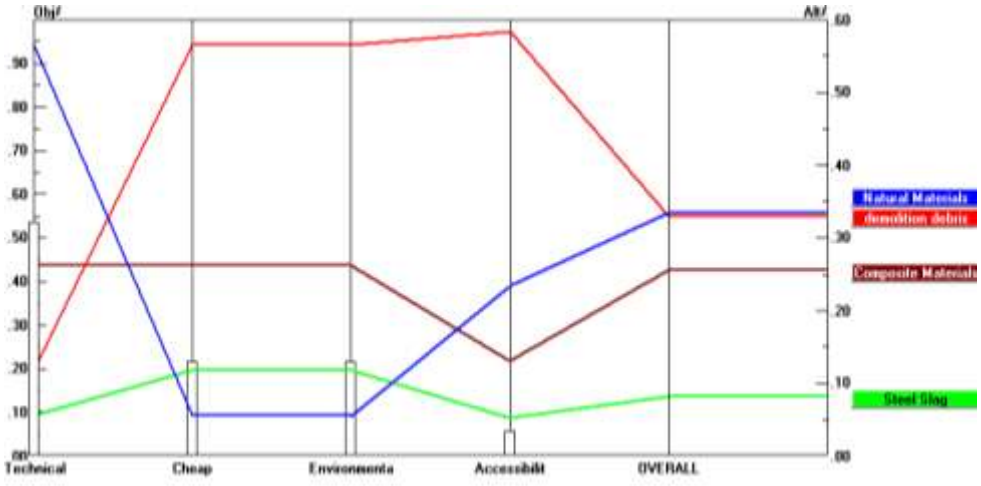
Archive of SID



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

Figure10. The importance of factors affecting the optimal materials according to experts

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 وضعیت مطلوبی داشته، درحالی‌که از نقطه‌نظر 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 نسبت به هم‌دیگر

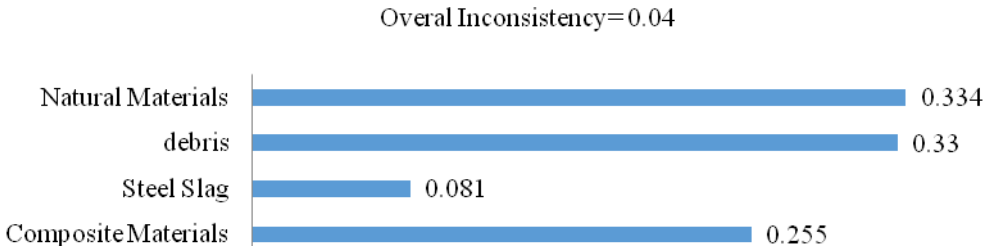
Figure11. The advantages and disadvantages of the different materials according to various criteria

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 درنظرگیری تمامی پارامترهای تاثیرگذار در انتخاب مصالح 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

www.SID.ir

Archive of SID

در راه‌سازی انتخاب می‌گردند. نزدیک بودن وزن خروجی نرم-افزار Expert choice برای نخاله‌های حاصل از گودبرداری و نیز مصالح ترکیبی ساخته‌شده از نخاله و سرباره فولادی، نشان-دهنده مناسب بودن این مصالح جهت استفاده در راه‌سازی با درنظرگیری تمامی عوامل ذکرشده می‌باشد.



شکل ۱۲- پنجره آنالیز نهایی مصالح

Figure12. The final analysis graph of materials

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی گردید استفاده از پسماندهای ساختمانی و صنعتی در لایه‌های مختلف راه با توجه به استانداردهای موجود راه‌سازی و هم‌چنین نظر کارشناسان و مسایل زیست‌محیطی امکان‌سنجی گردد. برای این منظور ابتدا با انجام آزمایش‌های مورد نیاز بر روی سه نمونه ساخته‌شده با استفاده از نخاله‌های حاصل از گودبرداری شهر تهران، سرباره‌های فولادی کوره قوس الکتریکی کارخانه فولاد اصفهان و نیز نمونه ترکیبی ساخته شده از این‌دو و با لحاظ کردن دانه‌بندی مناسب، کیفیت این مصالح جهت استفاده در راه‌سازی با استانداردهای ASTM مقایسه گردید. نتیجه آزمایش مقاومت در برابر ضربه و سایش برای نخاله‌های حاصل از گودبرداری ۲۳ و مقدار CBR برای این مصالح ۳۶/۲ به‌دست آمد که از این حیث در رده خوب برای لایه‌های روسازی راه قرار می‌گیرد. هم‌چنین ارزش ماسه‌ای این مصالح پس از شسته‌شدن برای استفاده در هر دو لایه اساس و زیراساس مناسب ارزیابی گردید. مقدار CBR محاسبه شده برای مصالح ترکیبی ساخته‌شده از نخاله و سرباره ۵۰/۴ برآورد شد که نشان‌دهنده قدرت باربری بالای این مصالح و مناسب بودن آن جهت استفاده در لایه اساس می‌باشد.

پس از اتخاذ تصمیم مناسب در حیطه مسایل فنی، استفاده از این پسماندها در راه‌سازی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی با نرم‌افزار Expert choice با توجه به تمامی پارامترهای تاثیرگذار در انتخاب مصالح مناسب از جمله مشخصات فنی، مسایل زیست‌محیطی، ارزانی مصالح و نحوه دسترسی و با اعمال میزان اهمیت هر یک از این پارامترها، قابلیت کاربرد هر یک از مصالح جهت استفاده در لایه‌های مختلف راه تعیین گردید. با توجه به نظر کارشناسان پس از مسایل فنی، قیمت و موضوعات زیست‌محیطی از اهمیت بالایی در تصمیم‌گیری جهت انتخاب مصالح برتر برخوردار بوده‌اند. نتایج این تحلیل نشان داد که نخاله‌های حاصل از گودبرداری مناطق مورد نظر دارای شرایط مشابهی با مصالح طبیعی برای استفاده در راه‌سازی می‌باشند. استفاده از مصالح ترکیبی نیز به‌دلیل ایجاد توانایی استفاده از سرباره‌های فولادی در لایه اساس و زیر اساس با توجه به شرایط زیست‌محیطی مناسب می‌باشد.

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

www.SID.ir

Archive of SID

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از آقایان مهندس سعادتی 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. واثقی. 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 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، (۲)۷، صص۹۱-۸۱.

۱۰. مرندی. 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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 Largesize coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the LosAngeles Machine.

17. ASTM D 4429 Test Method for CBR (California Bearing Ratios) of Soils in Place.

۱۸. قدسی‌پور. سید حسن، «مباحثی در تصمیم گیری 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 industry in Taiwan. *Expert Systems with Applications*, vol. 34, January, pp. 96-107.

۲۱. توفیق. فیروز، ۱۳۷۲، ارزشیابی چندمعیاری در طرح‌ریزی کالبدی، *مجله آبادی*، شماره ۱۱، صص ۴۰-۴۳.

۲۲. زبردست. اسفندیار، ۱۳۸۰، کاربرد فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، نشریه هنرهای زیبا، شماره ۱۰، صص ۲۱-۱۳.

23. Saaty, T. L., 2000. Fundamentals of descision 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.

www.SID.ir