

## ارزیابی اثرات آلودگی هوا در چهار روش روسازی به کمک چهار روش مرسوم

### تصمیم‌گیری چندمعیاره در ایران

علی‌رضا چراغی<sup>۱\*</sup>، فائزه برهانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

a.r.cheraghi@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

fborhani78@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۲۷

### چکیده

امروزه حمل و نقل یکی از بنیان‌های پیشرفت بشر محسوب می‌شود. روسازی و راهسازی از جمله موارد بسیار اساسی در عرصه‌ی حمل و نقل است. اما در این بین، کشور ما نیازمند راه‌هایی است که بتواند با دارا بودن سطح خدمات‌دهی بالا از منظر آلودگی هوا نیز به‌طرز مطلوبی رفتار نماید. در این پژوهش، برخی از روش‌های روسازی با هم مقایسه شده‌اند و رویه‌ای که با راه سبز، انطباق بیش‌تری دارد مشخص شده است. روش‌های روسازی مطرح شده بر مبنای چهار روش مرسوم روسازی ایران و جهان (آسفالت قیری، آسفالت متخلخل، بتن غلتکی، بتن اسفنجی) است که بررسی آن‌ها بر اساس معیارهای آلودگی هوای شهری و از طریق چهار شیوه‌ی تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی مرسوم انجام گرفته است (جمع وزنی ساده، برنامه‌ریزی سازشی، تاپسیس و عملگر میانگین وزنی مرتب). از جمله معیارهای مهم و مطرح زیست‌محیطی مربوط به آلودگی هوا، تأثیر رویه بر کاهش سوخت، قابلیت بهره‌گیری از منابع بازیافتی، عملکرد سازه‌ای و وظیفه‌ای رویه است. در نهایت، بتن اسفنجی به‌عنوان روش بهینه‌ی روسازی درون‌شهری در ایران، معرفی شده است.

### کلمات کلیدی

"روسازی شهری"، "آلودگی هوا"، "ارزیابی"، "تصمیم‌گیری چندمعیاره".

### ۱- مقدمه

سال ۱۹۸۷ تصمیم بر آن شد تا از این نوع روسازی در مقیاسی بزرگ‌تر استفاده شود (Liu, 2012) تا این‌که تا سال ۲۰۱۰ حدود ۹۰ درصد از آزادراه‌های هلند به این نوع آسفالت مجهز شد (Mo, 2010). اولین گزارش مربوط به ساخت روسازی بتنی به سال ۱۸۶۵ در اسکاتلند برمی‌گردد. بنابراین، قبل از جنگ جهانی اول در بسیاری از کشورها روسازی‌های بتنی با استفاده از غلتک، متراکم می‌شدند اما اولین نمونه‌های جدید روسازی بتن غلتکی<sup>۴</sup> در دهه‌ی ۱۹۷۰ در اسپانیا و در راه‌های کم‌آمد و شد اجرا شد. پس از سال ۱۹۸۰ کشورهای دیگری (مانند فرانسه، آلمان، ژاپن و آمریکا) نیز از این نوع روسازی بهره گرفته‌اند (PIARC, 2005). ساخت اولین جاده‌ی بتن اسفنجی<sup>۵</sup> نیز مربوط به سال ۱۹۵۴ میلادی می‌شود (Lee Kun, 2010). توسعه‌ی شهری در سده‌ی گذشته در جهان بدون در نظر گرفتن نیازهای جامع نسل‌های فعلی و آتی، سبب پدید آمدن لطمات

بیش از سه هزار سال است که ایرانیان شفته آهک را می‌شناسند و با آن راه می‌سازند. آهک‌پزی که مادر صنعت سیمان‌پزی است در ایران کشف شد. استفاده از بلوک‌های سنگی در روسازی راه تا سده‌های هفدهم، هجدهم و نوزدهم در ایران و اروپا رواج داشته است. بنا بر گزارشی تاریخی، مسیر قزوین تا اصفهان سنگ‌فرش بوده است. در همین زمان در ایالت مازندران حدود ۲۷۰ کیلومتر از این نوع جاده وجود داشته است (حامی، ۱۳۹۰). یکی از اولین طراحی‌های روسازی به دهه‌ی ۱۹۲۰ برمی‌گردد که در مورد آسفالت صفحه‌ای<sup>۱</sup> اجرا شد (Krishnan and Rajagopal, 2007). استفاده از مخلوط آسفالتی با درجه‌ی خدمت بالا<sup>۲</sup> در سال ۱۹۳۰ انجام گرفت (Collins, 2007). نخستین استفاده از روسازی آسفالت متخلخل<sup>۳</sup> در هلند و به‌سال ۱۹۷۲ به‌عنوان کاهنده‌ی سر و صدا در آزادراه‌ها انجام گرفت. در

فرآیند تحلیل چندمعیاره در حالت گروهی دارای دو یا چند تصمیم‌گیر است که هر یک اولویت‌ها و نگرش‌های متفاوتی به مسئله‌ی تصمیم‌گیری دارند. در این حالت، هدف از تصمیم‌گیری گروهی، رسیدن به گزینه‌ی بهینه از میان مجموعه‌ای از گزینه‌ها است به گونه‌ای که بیش‌ترین توافق میان تصمیم‌گیران برقرار شود. دو گام مهم، جهت پالایش اولیه‌ی داده‌های ورودی عبارتند از:

الف) تبدیل ورودی‌های بیانی به عددی: در پژوهش حال حاضر از مقیاس خطی که توسط مؤلفین متعددی به کار بسته شده استفاده می‌شود.

ب) به‌هنجارسازی داده‌ها: این کار، تأثیر بسیار زیادی روی نتایج استفاده از روش‌های تحلیل چندمعیاره دارد. در این مطالعه از روش زیر استفاده می‌شود (ضرغامی و همکاران، ۱۳۹۰):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x_{ij}}{Maxx_{ij}} \\ \frac{Minx_{ij}}{x_{ij}} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{برای معیار مثبت} \\ \text{برای معیار منفی} \end{array} \quad (1)$$

مقادیر معادل عددی وزن‌دهی کیفی به صورت زیر است:  
 معیارهای مثبت: بسیار کم: (۱)، کم: (۲)، نسبتاً کم: (۳)، متوسط: (۴)، نسبتاً زیاد: (۵)، زیاد: (۶)، بسیار زیاد: (۷).  
 معیارهای منفی: بسیار کم: (۷)، کم: (۶)، نسبتاً کم: (۵)، متوسط: (۴)، نسبتاً زیاد: (۳)، زیاد: (۲)، بسیار زیاد: (۱).  
 جدول وزن‌دهی کیفی (جدول ۱) با برآوردی از داده‌های دریافت شده از دفتر مطالعات فناوری و ایمنی دبیرخانه‌ی مجمع جهانی راه در ایران و مقایسه‌ی ویژگی‌های رویه‌ها به دست می‌آید.  
 در این پژوهش از چهار روش مرسوم تحلیل بهره گرفته شد:  
 • روش جمع وزنی ساده<sup>۱</sup>:

این روش ساده‌ترین و پرکاربردترین روش تحلیل چندمعیاره است. در این روش، همه‌ی معیارها به یک مقیاس متعارف تبدیل می‌شوند. این مقیاس، معمولاً بین صفر و یک اختیار می‌شود که عدد یک، نمایان‌گر بهترین عملکرد است. انتخاب گزینه‌ها بر اساس مقدار  $Z_k$  است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

فراوانی بر پیکره‌ی محیط‌زیست شد تا این که مجامع بین‌المللی در اواخر قرن بیستم، با جهت‌دهی توسعه‌ی شهری به سمت توسعه‌ی پایدار<sup>۲</sup> شهری این سیر لطمات را کندتر نمودند. توجه به مواردی چون تأثیر گازهای گلخانه‌ای، تغییرات آب و هوایی، تخریب لایه‌ی ازن و آلودگی هوای شهرها در گستره‌ی توسعه‌ی پایدار می‌گنجد (Roa, 2012). با رشد فزاینده‌ی شهرها نیاز به روسازی مناسب، افزایش یافته است و از طرفی آمد و شده‌ای خودروها سبب ایجاد مسایل زیست‌محیطی در شهرها شده است (Shen, et al., 2012). بنابراین ایجاد حمل و نقلی مطابق با محیط‌زیست، راه سبز و توسعه‌ی پایدار شهری در کشور ضرورت یافته است. راه سبز را می‌توان راهی معرفی نمود که بیش‌ترین انطباق را با محیط‌زیست داراست.  
 تاکنون در کشور، تحقیقات گسترده و جامعی پیرامون روسازی بهینه از منظر آلودگی هوا انجام نگرفته است و تنها پژوهش صورت گرفته در این زمینه مربوط به ارزیابی اثرات آلودگی هوای مربوط به ارزیابی سه روش روسازی با استفاده از شیوه‌های برنامه‌ریزی سازشی<sup>۳</sup> و تاپسیس<sup>۴</sup> (چراغی، ۱۳۹۴) توسط پژوهشگر حاضر بوده است.

## ۲- روش انجام تحقیق

### • روش‌های تحلیل چندمعیاره

در این پژوهش به دلیل وجود گزینه‌های زیست‌محیطی با دامنه‌ی گسترده نمی‌توان از روش کمی‌سنجی شبیه‌سازی بهره برد چرا که هیچ نوع روش شبیه‌سازی قادر به مقایسه‌ی تمامی معیارهای مطرح شده را ندارد و هم‌چنین از آن جایی که اجرای آزمایشی این نوع رویه‌ها نیازمند مدت‌زمان طولانی و هزینه‌ی بالا می‌باشد ضرورت بهره‌گیری از روشی که بتواند به نتیجه‌گیری اولیه‌ی آسان و کیفی از میان روش‌های روسازی منجر شود وجود دارد. از این رو بایستی از نتیجه‌ی آزمایش‌های علمی موجود در عرصه‌ی بین‌المللی جهت تعمیم آن به داخل کشور استفاده نمود. روش پیش‌روی این پژوهش، تحلیل یا تصمیم‌گیری چندمعیاره<sup>۵</sup> می‌باشد که از مزایای آن، بررسی ابعاد مختلف احتمالات گزینه‌های یک تصمیم‌گیری به صورت کیفی است (ضرغامی و همکاران، ۱۳۹۰).

مراحل حل مسئله به صورت زیر است:

۱- بهنجارسازی داده‌های تصمیم: برای این کار از معادله ۱ استفاده می‌شود که در آن مقدار  $r_{ij}$  مقدار بهنجارشده است.

۲- وزن دار کردن داده‌های بهنجارشده در مرحله قبل:

$$v = [w_j r_{ij}] \quad (3)$$

$$s_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_j \cdot r_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (1)$$

که در آن:

$w_j$ : وزن معیار  $j$  ام

$r_{ij}$ : امتیاز بهنجار گزینته  $i$  ام از دید معیار  $j$  ام است که توسط معادله ۱ قابل محاسبه است (ضرغامی و همکاران، ۱۳۹۰).

۳- تعیین جواب‌های آرمانی  $A^+$  و غیرآرمانی  $A^-$  برای هر معیار:

$$A^+ = \left\{ \left( \text{Max}_{v_{ij}, j \in J} \right) \left( \text{Min}_{v_{ij}, j \in J'} \right); i=1, 2, \dots, m \right\} = \left\{ v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_m^+ \right\} \quad (4)$$

• روش تاپسیس:

این روش از روش‌های فاصله محور است. در این روش، گزینه‌ی انتخابی باید کوتاه‌ترین فاصله از جواب آرمانی و دورترین فاصله از جواب غیرآرمانی را داشته باشد.

$$A^- = \left\{ \left( \text{Min}_{v_{ij}, j \in J} \right) \left( \text{Max}_{v_{ij}, j \in J'} \right); i=1, 2, \dots, m \right\} = \left\{ v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_m^- \right\} \quad (5)$$

جدول ۱- وزن‌دهی کیفی معیارها

وزن گزینه‌های مورد نظر				وزن معیارها	امتیاز	معیارها
بتن اسفنجی	بتن غلتکی	آسفالت متخلخل	آسفالت قیری			
بسیار کم	کم	نسبتاً زیاد	بسیار زیاد	متوسط	منفی	میزان ذرات آلاینده‌ی ناشی از تولید رویه
کم	نسبتاً کم	بسیار کم	نسبتاً کم	متوسط	منفی	میزان گازهای آلاینده‌ی ناشی از تولید رویه
بسیار زیاد	زیاد	کم	بسیار کم	بسیار زیاد	مثبت	کاهش مصرف سوخت خودروها
بسیار زیاد	بسیار کم	بسیار زیاد	متوسط	بسیار زیاد	مثبت	عملکرد وظیفه‌ای رویه
بسیار کم	کم	نسبتاً زیاد	بسیار زیاد	نسبتاً زیاد	منفی	میزان سوخت اولیه و ثانویه جهت تولید رویه
بسیار زیاد	بسیار زیاد	متوسط	نسبتاً کم	بسیار زیاد	مثبت	استفاده از منابع بازیافتی
بسیار زیاد	زیاد	کم	بسیار کم	زیاد	مثبت	عملکرد سازه‌ای رویه

- روش میانگین وزنی مرتب<sup>۱۱</sup>:

این عملگر نگاشتی از فضای  $n$  بعدی به فضای یک بعدی است:  $F: R^n \rightarrow R$ . این عملگر برای محاسبه‌ی هوشمند در تحلیل چندمعیاره به کار می‌رود که وابسته به یک بردار وزنی  $n$  بعدی،  $u$  است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_i(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) = \sum_{j=1}^n u_j b_{ij} = u_1 b_{i1} + u_2 b_{i2} + \dots + u_n b_{im} \quad (10)$$

که در آن:

$b$ : مجموعه‌ی مقادیر نزولی مرتب شده‌ی بردار  $x$

$u$ : وزن رتبه‌ها با وزن نسبی هر معیار تفاوت دارد و تنها ناظر بر رتبه‌ی هر ورودی است به طوری که  $u_j \geq 0$  و  $\sum_{j=1}^n u_j = 1$ .

خصوصیت مهم وزن رتبه‌ها در این عملگر، انعکاس درجه‌ی خوش‌بینی تصمیم‌گیر است. منظور از خوش‌بینی تصمیم‌گیر، میزان و درجه‌ی پذیرش زیان‌پذیری در تصمیم‌گیری است. برای این منظور هر چه بردار وزن رتبه‌ها، عددهای بزرگ‌تری را در ابتدای خود داشته باشد تصمیم‌گیر میزان خوش‌بینی بیش‌تری دارد.

روش‌های مختلفی برای به دست آوردن بردار وزن رتبه‌ها وجود دارد که در این مقاله از روش کمیت‌سنج‌های بخشی استفاده می‌شود. برای انتخاب کمیت‌سنج مناسب بایستی از تصمیم‌گیر سؤال شود که چه تعداد معیار را قصد دارد در تصمیم‌گیری در نظر بگیرد. سپس از رابطه‌ی توسعه یافته‌ی زیر، بردار وزن رتبه‌ی  $u$  متناظر با هر درجه‌ی خوش‌بینی را به دست می‌آید:

$$\theta = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (n-j) u_j \quad (11)$$

$$u_j = Q\left(\frac{j}{n}\right) - Q\left(\frac{j-1}{n}\right), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

در این مطالعه، کمیت‌سنج نوع  $Q(r) = r^\alpha$  به کار می‌رود که وقتی  $n$  به سمت بی‌نهایت میل می‌کند به کمک دو معادله‌ی ۱۱ و ۱۲،  $\theta$  برابر خواهد بود با:

$$\theta = \int_0^1 Q(r) dr = \int_0^1 r^\alpha dr = \frac{1}{\alpha+1} \quad (13)$$

به طوری که  $j$  مربوط به معیارهای مثبت و  $j'$  مربوط به معیارهای منفی است.

۴- برآورد مقدار فاصله‌ی هر گزینه تا جواب‌های آرمانی و غیرآرمانی که به ترتیب زیر نشان داده می‌شوند:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

۵- رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از محاسبه‌ی نزدیکی نسبی  $C_i^+$  هر گزینه به جواب آرمانی (ضرغامی و همکاران، ۱۳۹۰):

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

- روش برنامه ریزی سازشی:

مبنای این روش بر اساس مفهوم جابه‌جایی میزان آرمانی است. در این روش، اولویت‌بندی و امتیازدهی به گزینه‌ها بر اساس فاصله‌ی آن‌ها از نقطه‌ی نامطلوب انجام می‌گیرد. مطلوبیت هر گزینه با  $L_i$  نشان داده می‌شود که بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$L_i = \left[ \sum_{j=1}^m W_j^p \left( \frac{x_{ij} - f_j^w}{f_j^* - f_j^w} \right)^p \right]^{1/p} \quad (9)$$

که در آن:

$f_j^*$ : مقدار مطلوب برای معیار  $j$  در بین تمام مقادیر ممکن برای گزینه‌ها

$f_j^w$ : مقدار نامطلوب برای معیار  $j$  در بین تمام مقادیر ممکن برای گزینه‌ها است که قبلاً در تعریف معادله‌ی ۱ معرفی شدند.

$p$ : عاملی است که حساسیت تصمیم‌گیر به فاصله از نقطه‌ی آرمانی را از دید هر یک از معیارها بیان می‌دارد.

با  $p=1$  همه‌ی فاصله‌ها به اندازه‌ی وزن خود در نظر گرفته می‌شود و بر اساس  $p=2$  فاصله‌ی بزرگ‌تر، اثر بیش‌تر دارد. برای  $p=\infty$  بزرگ‌ترین اختلاف مدنظر است و تنها این اختلاف کمینه می‌شود (ضرغامی و همکاران، ۱۳۹۰).

- به طور متوسط، میزان سر و صدای ناشی از آمد و شد پرحجم یا متراکم بر روی آسفالت متخلخل حدود ۳ دسی بل پایین تر از میزان سر و صدای تولید شده در آسفالت سنتی است و در بسیاری از راه-های با روکش بتن سیمانی، میزان سر و صدا ۵ تا ۷ دسی بل بالاتر از میزان سر و صدای تولید شده بر روی آسفالت معمولی است (PIARC, 2007).

- از مزایای آسفالت متخلخل، کاهش مقاومت غلظتی سطح راه است. در حال حاضر، تنها چند داده‌ی کلی در این خصوص در دسترس است.

با این حال، به نظر می‌رسد تحت شرایط خاص، صرفه‌جویی در میزان سوخت می‌تواند کاملاً چشم‌گیر باشد. در این رابطه، مقادیر حدوداً ۱ تا ۲ درصد گزارش شده است. کاهش نیروی پसार آسفالت متخلخل در مقایسه با آسفالت گرم قیری و کوبیده شده تا حدی بیش تر است (PIARC, 2007).

- ضایعات لاستیکی حاصل از لاستیک‌های فرسوده‌ی خودروها از مشکلات بزرگ زیست‌محیطی به‌شمار می‌رود. استفاده از ضایعات خرده‌ی لاستیک در روسازی راه‌ها راهی برای دفع ضایعات برجای مانده است. با استفاده از خرده لاستیک در آسفالت متخلخل، افزایش طول عمر و کاهش بیش تر سر و صدا حاصل می‌شود.

مقدار  $\alpha$  به ازای درجات خوش‌بینی مختلف که هر کدام متناظر با یک کمیت‌سنج کیفی است از جدول ۲ به دست می‌آید. در حالتی که معیارها خود دارای اهمیت نسبی  $w$  باشند، پس از ضرب کردن هر ورودی در وزن نسبی آن، مطابق معادله‌ی ۳، عمل می‌شود (ضرغامی و همکاران، ۱۳۹۰).

### • ویژگی‌های فنی رویه‌ها

در این پژوهش، چهار روش روسازی، مورد توجه قرار گرفته است که رویه‌های دیگر با رویه‌ی آسفالت قیری مقایسه می‌شوند:

#### • رویه‌ی آسفالت متخلخل:

- مصالح سنگ‌دانه‌ای آن‌ها از نوع شکسته و اندودشده بوده و دانه‌بندی ناپیوسته و باز آن‌ها در ترکیب با مقدار کمی ماستیک، سبب به وجود آمدن درصد بالایی از فضای خالی (بیش از ۲۰٪) در آسفالت متخلخل می‌شود (PIARC, 2007).

- آسفالت متخلخل علی‌رغم داشتن تخلخل بیش تر و مقدار قیر نسبتاً زیاد خود، مقاومت زیادی در برابر تغییر بیش تر شکل دائمی از خود نشان می‌دهد و نیز اثری از شیارشدگی بر روی این آسفالت دیده نمی‌شود. آسفالت متخلخل اغلب به‌عنوان لایه‌ی ضدشیارشدگی شناخته می‌شود و افزایش عمر و دوام آسفالت متخلخل در مقایسه با آسفالت قیری می‌باشد (PIARC, 2007).

جدول ۲- میزان خوش‌بینی متناظر با هر کمیت‌سنج کیفی (ضرغامی و همکاران، ۱۳۹۰)

$\alpha$	درجه‌ی خوش‌بینی ( $\theta$ )	نوع نگرش	کمیت‌سنج
$\alpha \rightarrow \infty$	۰/۰۰۱	بدبینانه	همه‌ی معیارها
۱۰	۰/۰۹۱	بدبینانه	اکثر معیارها
۲	۰/۳۳۳	بدبینانه	بیش تر معیارها
۱	۰/۵۰۰	خنثی	نیمی از معیارها
۰/۵	۰/۶۶۷	خوش‌بینانه	برخی از معیارها
۰/۱	۰/۹۰۹	خوش‌بینانه	کمی از معیارها
$\alpha \rightarrow ۰$	۰/۹۹۹	خوش‌بینانه	کمینه یکی از معیارها

و ساختار توزیعی یکسانی از حباب‌های کوچک هوا است. هوا به روش مکانیکی در مخلوط ایجاد می‌شود و حداقل حجم هوای بتن ۲۰٪ است (چراغی، ۱۳۹۴، Gelim, 2011).

- چگالی این نوع بتن‌ها در حدود ۷۰ درصد بتن‌های معمولی است و در محدوده‌ی ۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب قرار دارد. محدوده‌ی تخلخل لایه‌ی رویه ۱۵ تا ۲۵ درصد و برای لایه‌ی اساس ۲۰ تا ۴۰ درصد می‌تواند باشد (چراغی، ۱۳۹۴- Tennis, et al., 2004).

- محدوده‌ی معمول نفوذپذیری مشابه با آسفالت متخلخل، ۰/۲ تا ۰/۵۴ سانتی‌متر در ثانیه است (اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ۱/۲ سانتی‌متر در ثانیه را نیز نشان داده است) (چراغی، ۱۳۹۴- Tennis, et al., 2004).

- بتن اسفنجی با دارا بودن ویژگی‌های لازم می‌تواند در جذب صدا تأثیرات مطلوبی ایجاد نماید (چراغی، ۱۳۹۴، Ramamurthy, et al., 2008).

- تحقیقات نشان داده که با گذشت ۸۰ دوره‌ی (هر دوره، یک روز) یخ‌زدگی و ذوب‌شدگی، ضریب پویایی تا بالای ۹۵ درصد حفظ شده است (چراغی، ۱۳۹۴، Neithalath, et al., 2003).

- نتایج تحقیقات نشان داده است که بتن اسفنجی نسبت به تهاجم مواد شیمیایی (خصوصاً سولفات‌ها) مقاومت خوبی دارد (چراغی، ۱۳۹۴، Jones and Mc.Carthy, 2005).

- مقاومت فشاری این بتن در گستره‌ی زیادی قرار دارد (۳/۵ تا ۲۸ مگاپاسکال در سن ۲۸ روزگی) که به‌طور معمول ۱۷ مگاپاسکال است (چراغی، ۱۳۹۴، Tennis, et al., 2004).

#### • معیارهای فنی لحاظ شده

معیارهای آلودگی هوای در نظر گرفته شده مطابق موارد زیر می‌باشد:

• میزان ذرات آلاینده‌ی ناشی از تولید رویه:

آسفالت:

برای نمونه از نتایج پژوهش اشرفی و همکاران (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۲) در سال ۱۳۹۲ استفاده شد. با استفاده از ضرایب نشر پیشنهادی توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده‌ی آمریکا، میزان آلاینده‌های تولیدی توسط کارخانه آسفالت محور سراب- بستان آباد محاسبه شد. سپس با

افزایش طول عمر روسازی تا رسیدن به گسیختگی از حدود ۹ سال تا ۱۲ سال گزارش شده است (PIARC, 2007).

- عمر مفید آسفالت متخلخل در مقایسه با آسفالت سنتی کوتاه‌تر است. در کشور هلند، اغلب این نکته که آسفالت متخلخل باید بعد از حدود ۹ سال نوسازی شود یک قاعده‌ی کلی محسوب می‌شود. برحسب حجم آمد و شد و شرایط زیست‌محیطی، میزان تخلخل آسفالت متخلخل در یک دوره‌ی ۳ تا ۱۰ ساله در مجموع، ۵ تا ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت (PIARC, 2007).

• رویه‌ی بتن غلتکی:

- حداکثر پوسته شدن این رویه در برابر یخ‌زدگی و ذوب‌شدگی بعد از ۵۶ دوره (هر دوره، یک روز) کم‌تر از یک کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد. در خصوص مقاومت در برابر یخ‌زدان، رفتار روسازی بتن غلتکی در نواحی با زمستان‌های سخت (کشورهای اسکانديناوی، کانادا، قسمت‌های شمالی آمریکا) بسیار رضایت‌بخش بوده است (PIARC, 2005).

- استفاده از دوده‌ی سیلیس، تا ۱۰ درصد وزن قیر، باعث بهبود خصوصیات مانند مقاومت و دوام می‌شود. (در سوئد، نروژ، دانمارک و استرالیا گزارش شده است). همچنین با به‌کار بردن خاکستر بادی در بتن غلتکی، قیمت تمام شده کاهش می‌یابد و روانی بتن بهبود می‌یابد (PIARC, 2005).

- در روسازی‌هایی که به‌درستی اجرا شده‌اند معمولاً نمونه‌های گرفته شده‌ی از راه، مقاومت بالایی را نشان داده‌اند. برای نمونه، به‌مقاومت‌های شکاف خوردگی ۲۸ روزه‌ی بین ۲/۵ تا ۴ مگاپاسکال می‌توان اشاره کرد (PIARC, 2005).

- نتایج به‌دست آمده از بعضی از آزمایش‌های آلمانی بیانگر این مطلب است که این روسازی‌ها برای بارهای متوسط تا سنگین وارد بر روی سطح، مناسب هستند و مقاومت این نوع رویه در برابر ساییدگی رضایت‌بخش عنوان شده است (PIARC, 2005).

- این رویه برای سرعت‌های متوسط در راه‌های معمول و با حجم آمد و شد پایین مناسب است (PIARC, 2005).

• رویه‌ی بتن اسفنجی:

- بتن اسفنجی (متخلخل یا حبابی) یکی از انواع بتن‌های سبک محسوب می‌شود که شامل خمیر سیمان پرتلند یا ملات سیمانی

به ترتیب حدود ۹۰ و ۲۸۷ بار بیش تر از حد مجاز است. همچنین مقایسه‌ی غلظت‌های بیشینه‌ی ذرات معلق در حالت پایش شده با استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (جدول ۳) برای متوسط زمانی ۲۴ ساعته (۴۵۹۳/۹) میکرو گرم بر متر مکعب در مقایسه با استاندارد ۱۵۰ میکروگرم بر متر مکعب) نشان می‌دهد که غلظت این ماده از این استاندارد نیز حدود ۳۰ برابر بیش تر است (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۲).

سیمان:

جهت نمونه از نتایج کارخانه‌ی سیمان سامان کرمانشاه در سال ۱۳۹۰ و ۹۱ (الماسی و همکاران، ۱۳۹۲) بهره گرفته شد. میزان حد مجاز انتشار ذرات معلق در ارتباط با مسایل زیست‌محیطی

به‌کارگیری و استفاده از شبیه‌سازی ایرمود<sup>۱۲</sup> نحوه‌ی پراکنش این آلاینده‌ها در محوطه‌ی اطراف کارخانه برای هر یک از آلاینده‌ها برای متوسط‌های زمانی ۱، ۳، ۸ و ۲۴ ساعته، همچنین دوره‌ی آماری ۱ و ۱۲ ماهه در دو مقیاس منطقه‌ای (محدوده‌ی ۲۰ در ۲۰ کیلومتر مربعی) و محلی (محدوده‌ی یک در یک کیلومتر مربعی) شبیه‌سازی شد (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۲). مقایسه‌ی غلظت‌های بیشینه‌ی محیطی ذرات معلق در حالت پایش شده با استاندارد هوای پاک ایران در سال ۱۳۹۰ (جدول ۳) برای متوسط زمانی بیست و چهار ساعته (۴۵۹۳/۹) میکرو گرم بر متر مکعب در مقایسه با استاندارد ۵۰ میکرو گرم بر متر مکعب) و متوسط زمانی یک ساله (۵۷۵۴/۳۶) میکرو گرم بر متر مکعب در مقایسه با استاندارد ۲۰ میکرو گرم بر متر مکعب) نشان می‌دهد که غلظت این ماده در بازه‌های زمانی ذکر شده

جدول ۳- استاندارد هوای پاک در ایران و ای.پی.ای (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۲)

استاندارد ای.پی.ای		استاندارد ایران در سال ۱۳۹۰		بازه‌ی زمانی	نوع آلاینده
پی.پی.ام	میکروگرم بر متر مکعب	پی.پی.ام	میکروگرم بر متر مکعب		
-	۹	۹	۱۰۰۰۰	بیشینه ۸ ساعته	تک اکسید کربن
-	۳۵	۳۵	۴۰۰۰۰	بیشینه ۱ ساعته	
-	-	۰/۰۲۱	۴۰	سالانه	دو اکسید کربن
-	۰/۱	-	-	یک ساعته	
-	-	۰/۰۰۷	۲۰	سالانه	دو اکسید گوگرد
-	۰/۰۷۵	۰/۰۳۷	۱۰۰	بیشینه ۲۴ ساعته	
-	-	-	۲۰	سالانه	ذرات معلق زیر ۱۰ میکرون
۱۵۰	-	-	۵۰	بیشینه ۲۴ ساعته	
۱۲	-	-	۱۰	سالانه	ذرات معلق زیر ۲/۵ میکرون
۳۵	-	-	۲۵	بیشینه ۲۴ ساعته	

مقایسه‌ی غلظت‌های محیطی بیشینه‌ی دو اکسید گوگرد با استاندارد هوای پاک ایران در سال ۱۳۹۰ برای متوسط زمانی ۲۴ ساعته (۴۲/۲۹ پی.پی.بی در مقایسه با استاندارد ۳۷ پی.پی.بی) و متوسط زمانی یک ساله (۳۰/۴۷ پی.پی.بی در مقایسه با استاندارد ۷ پی.پی.بی) نشان می‌دهد که غلظت این ماده در بازه‌های زمانی ذکر شده بالاتر از حد مجاز است اما مقایسه‌ی غلظت محیطی این ماده با استاندارد سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا برای متوسط زمانی ۲۴ ساعته (۴۲/۲۹ پی.پی.بی در مقایسه با استاندارد ۷۵ پی.پی.بی) نشان می‌دهد که غلظت این ماده پایین‌تر از حد مجاز این استاندارد است. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده‌ی سخت‌گیری استانداردهای هوای پاک در ایران باشد (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۲).

سیمان:

بیش‌ترین میزان آلاینده‌ی در دودکش‌های خروجی الکتروفیلتر و پیش‌گرمکن در فصل زمستان و پاییز بوده است. به‌طور کلی در میان گازهای آلاینده‌ی مورد مطالعه، گاز تک اکسید کربن بیش‌ترین میزان آلاینده‌ی را داشته است و گاز دو اکسیدنیترژن مقادیر کم‌تری را نشان داد. مقادیر گاز دو اکسید گوگرد در حد صفر بوده است (الماسی و همکاران، ۱۳۹۲).

میانگین غلظت آلاینده‌های گازی دو اکسید گوگرد و دو اکسید نیترژن کارخانه‌ی سیمان سامان، بسیار ناچیز است اما میزان آلاینده‌ی خروجی تک اکسید نیترژن در بیش‌تر مواقع بالاتر از حد مجاز استاندارد به‌دست آمد (الماسی و همکاران، ۱۳۹۲).

آمار حاکی از این است که دو اکسید گوگرد در تولید آسفالت و تک اکسید کربن در تولید سیمان فراتر از حد مجاز هستند که هر دو نمونه کارخانه در این معیار، برابر یک‌دیگر فرض می‌شود. همانند معیار پیشین، با توجه به این کارخانه‌های سیمان و آسفالت در خارج از شهر قرار دارند میزان تأثیر این معیار بسیار کاهش می‌یابد. همچنین آسفالت متخلخل با توجه به دارا بودن مزیت تخلخل آن، نسبت به بقیه‌ی گزینه‌ها بهتر فرض شده است.

• کاهش مصرف سوخت خودروها:

خروجی دودکش کارخانه سیمان در استاندارد ثانویه برابر ۱۵۰ میکرو گرم بر متر مکعب می‌باشد که بر اساس نتایج حاصل از مطالعه در هیچ یک از ایستگاه‌های مورد نظر، میزان آلودگی بالاتر از حد مجاز استاندارد نمی‌باشد. میانگین ذرات معلق خروجی در سال ۱۳۹۱، ۶۸/۶ میکرو گرم بر متر مکعب به‌دست آمد (الماسی و همکاران، ۱۳۹۲) که این میزان پایین‌تر از مقادیر به‌دست آمده در کارخانه سیمان کرمان با میانگین ۳۸۰ میکرو گرم بر متر مکعب (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹) و در کارخانه سیمان بهبهان با میانگین ۱۵۲ میکرو گرم بر متر مکعب (اکبری و همکاران، ۱۳۹۰) می‌باشد.

با توجه به متخلخل بودن بتن اسفنجی نسبت به بتن غلتکی، بتن اسفنجی در وزن‌دهی گزینه‌ها در رده‌ی بالاتری قرار می‌گیرد. همچنین به‌دلیل این که کارخانه‌های سیمان و آسفالت در خارج از شهر قرار دارند میزان تأثیر این معیار بسیار کاهش یافته است اما نکته‌ی قابل ذکر دیگر، ضرورت وجود کارخانه‌ی آسفالت در نزدیکی هر شهر است درحالی که برای سیمان، چنین ضرورتی وجود ندارد.

• میزان گازهای آلاینده‌ی ناشی از تولید رویه: آسفالت:

مقایسه‌ی غلظت‌های محیطی بیشینه‌ی تک اکسید کربن با استاندارد هوای پاک ایران در سال ۱۳۹۰ و استاندارد هوای پاک سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (که برای این ماده با هم برابر هستند) برای متوسط زمانی یک ساعته (۰/۴۵۱۲ پی.پی.ام در مقایسه با استاندارد ۳۵ پی.پی.ام) و متوسط زمانی هشت ساعته (۰/۰۸۳۷ پی.پی.ام در مقایسه با استاندارد ۹ پی.پی.ام) نشان می‌دهد که غلظت این ماده در بازه‌های زمانی ذکر شده پایین‌تر از حد مجاز است (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۲).

مقایسه‌ی غلظت‌های محیطی بیشینه‌ی دو اکسید نیترژن با استاندارد هوای پاک ایران در سال ۱۳۹۰ برای متوسط زمانی سالیانه (۷/۲۳ پی.پی.بی در مقایسه با استاندارد ۲۱ پی.پی.بی) نشان می‌دهد که غلظت این ماده در بازه زمانی مذکور پایین‌تر از حد مجاز است. نتیجه‌ی مقایسه‌ی غلظت این ماده با استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا، ای.پی.ای ۱۳ (۷/۲۳ پی.پی.بی در مقایسه با استاندارد ۱۰۰ پی.پی.بی) نیز به‌همین صورت است (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۲).



شده در آسفالت سنتی است و در بسیاری از راه‌های با روکش بتن سیمانی، میزان سر و صدا ۵ تا ۷ دسی‌بل بالاتر از میزان سر و صدای تولید شده بر روی آسفالت معمولی است (چراغی، ۱۳۹۴، PIARC, 2007) و بتن اسفنجی با دارا بودن ویژگی‌های لازم می‌تواند در جذب صدا تأثیرات مطلوبی ایجاد نماید (چراغی، ۱۳۹۴، Neithalath, et al., 2003).

- میزان سوخت اولیه و ثانویه جهت تولید رویه: برای پخت هر تن آسفالت، حدود ۸ لیتر گازوییل مصرف می‌شود. اگر ضخامت آسفالت ۱۵ سانتی‌متر و وزن مخصوص آسفالت حدود ۲/۲ تن در متر مکعب باشد سوخت مصرفی در هر متر مربع آسفالت برابر حدود ۳ لیتر در متر مربع خواهد بود. برای تولید هر تن سیمان نیز حدود ۹۰ لیتر مازوت مصرف می‌شود. اگر ضخامت روسازی بتنی را ۲۵ سانتی‌متر و عیار سیمان بتن را ۴۰۰ کیلوگرم فرض کنیم سوخت مصرفی در هر متر مربع روسازی بتنی برابر ۹ لیتر در متر مربع خواهد بود (علیخانی، ۱۳۹۲). اگر طول عمر روسازی بتنی ۳۰ تا ۵۰ سال (Smith, 2006) و روسازی آسفالتی حداقل ۱۲ و متوسط ۱۶ سال باشد می‌توان ابراز داشت که به‌طور تقریبی و در جهت اطمینان، میزان سوخت مصرفی اولیه در هر دو یکسان خواهد بود (علیخانی، ۱۳۹۲). گرچه بررسی‌های انجام شده توسط مؤسسه‌ی آتنا در چهار جاده در سال ۱۹۹۹ نشان داد که در تمام نمونه‌ها روسازی بتنی انرژی اولیه‌ی کم‌تری نیاز دارد. بر اساس این بررسی‌ها انرژی اولیه در آسفالت دو تا چهار برابر بیش‌تر از روسازی‌های بتنی است (پاشا، ۱۳۸۹). در بررسی‌هایی که بر روی آزادراه‌های کبک در کانادا مشخص شد که اگر انرژی مورد نیاز برای تولید اولیه (قیر و سیمان) در تحلیل، لحاظ نشود میزان صرفه‌جویی انرژی ثانویه‌ی روسازی‌های بتنی نسبت به روسازی‌های آسفالتی در حدود ۳۱ تا ۸۱ درصد است (چراغی، ۱۳۹۴، Smith and Maillard, 2007).

- استفاده از منابع بازیافتی: در سال‌های اخیر که استفاده از منابع طبیعی، بسیار رشد یافته است ضرورت استفاده از منابع بازیافتی بیش از پیش، احساس می‌شود. روسازی بتنی با محصولات جانبی صنعتی نظیر خاکستر

بزرگ‌ترین عامل افزایش درجه‌ی حرارت زمین، دو اکسید کربن است. این ماده، لایه‌ی عایقی ایجاد می‌نماید که کره‌ی زمین را در بر می‌گیرد و پدیده‌ای ایجاد می‌کند که آن را اثر گل‌خانه‌ای می‌نامند (ساریچی، ۱۳۹۱).

مقاومت غلته‌ی در حرکت خودروها مؤثر است به‌گونه‌ای که با کاهش آن، تا حدی از مصرف سوخت خودروها کاسته می‌شود. نیروی پसार و مقاومت به غلته‌ی به زبری سطح جاده وابسته است. هر چه میزان زبری سطح جاده کاهش یابد نیروی پसार جاده نیز کاهش می‌یابد. بنابراین در سطح جاده‌هایی که بافت ریزدانه‌تری دارند (بتنی) نیروی پसार کم‌تر است. همچنین با تخلخل سطح جاده، نیروی پसार نیز کاهش خواهد یافت. برای نمونه، نیروی پसार آسفالت متخلخل در مقایسه با آسفالت قیری تا حدی کم‌تر است (چراغی، ۱۳۹۴، PIARC, 2007).

تغییر شکل حاصل از وسایل نقلیه‌ی سنگین در روسازی‌های آسفالتی بیش‌تر از روسازی‌های بتنی است. بنابراین قسمتی از انرژی وسیله‌ی نقلیه برای غلبه بر این تغییر شکل استفاده می‌شود (پاشا، ۱۳۸۹). تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت از ۴/۱ تا ۴/۹ درصد و در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت از ۵/۴ تا ۶/۹ درصد در مصرف سوخت وسایل نقلیه‌ی سنگین عبوری از روسازی‌های بتنی (در مقایسه با روسازی‌های آسفالتی) صرفه‌جویی می‌شود (چراغی، ۱۳۹۴، Taylor, et al., 2004).

- عملکرد وظیفه‌ای رویه: عملکرد کلی روسازی، شامل دو نوع عملکرد وظیفه‌ای و سازه‌ای است. عملکرد وظیفه‌ای، چگونگی خدمت‌دهی روسازی به استفاده‌کنندگان از راه، از نظر راحتی رانندگی و کیفیت کاربری است (نشریه‌ی ۲۴۳ وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۰). در این بخش، آلودگی صوتی ناشی از حرکت خودروها و عدم سلب آرامش، مد نظر قرار گرفته است به‌نحوی که هر چه جاده‌ای بتواند عملکرد مطلوب‌تری در کاهش آلودگی صوتی و ایجاد آرامش روانی از خود نشان دهد عملکرد وظیفه‌ای بهتری را داراست.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد به‌طور متوسط، میزان سر و صدای ناشی از آمد و شد پرچم یا متراکم بر روی آسفالت متخلخل حدود ۳ دسی‌بل پایین‌تر از میزان سر و صدای تولید

روسازی از میزان خدمت‌دهی اولیه به‌میزان خدمت‌دهی نهایی برسد. خدمت‌دهی یک روسازی به‌عنوان توانایی آن برای ارایه‌ی خدمت به آمد و شدی که از آن استفاده می‌کند تعریف می‌شود. این نشانه با اندازه‌گیری ناهمواری و خرابی (ترک، لکه‌گیری و شیار) بیان می‌شود. این خدمت‌دهی بر حسب نشانه‌ی خدمت‌دهی فعلی<sup>۱۴</sup> در یک زمان معین در طی عمر طراحی و بهره‌برداری روسازی تعیین می‌شود. بهره‌برداری اولیه‌ی از راه، بیشینه است و بعد از مدتی که راه مورد استفاده قرار می‌گیرد کاهش می‌یابد.

اساسی‌ترین عواملی که در کاهش خدمت‌دهی روسازی تاثیر می‌گذارد آمد و شد و شرایط محیطی است (نشریه‌ی ۲۴۳ وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۰). معیار مذکور، شامل مواردی هم‌چون مقاومت در برابر دوره‌های یخ‌زدان، تهاجمات مواد شیمیایی و نفتی و مقاومت فشاری، کششی و خمشی روسازی می‌شود که با توجه به مقایسه‌ی مشخصات رویه‌ها در بخش بررسی روش‌های روسازی مورد نظر، عملکرد سازه‌ای رویه‌های بتنی بسیار بیش‌تر از رویه‌های آسفالتی می‌باشد (پیدایش و همکاران، ۱۳۸۸، پاشا، ۱۳۸۹، چراغی، ۱۳۹۴).

هر چه مقدار مقاومت سطح جاده‌ای در برابر تغییر بیش‌تر باشد مقدار ناهمواری آن کاهش می‌یابد. به‌همین دلیل، با کاهش

بادی و سیمان سرباره می‌تواند همراه شود که تقاضا برای مصالح دست نخورده را کاهش می‌دهد و منابع طبیعی را از دست‌برد بیش‌تر، محافظت می‌نماید. در ضمن، روسازی بتنی، تجدیدشدنی و صد درصد قابل بازیافت است (پیدایش و همکاران، ۱۳۸۸). عملیات بازیافت در تمامی روسازی‌های بتنی قابل استفاده است. البته اجرای این عملیات در روسازی بتنی مسلح با مشکلات بیش‌تری همراه است. به هر حال پیشرفت‌هایی که در زمینه‌ی ماشین‌آلات اجرایی به‌وقوع پیوسته عملیات خروج فولاد از بتن تسهیل شده است (پاشا، ۱۳۸۹). در روسازی‌های آسفالتی نیز ضایعات لاستیکی به‌عنوان ماده‌ی پسماند قابلیت به‌کارگیری دارد (PIARC, 2007).

در این معیار، با توجه به قابلیت استفاده بیش‌تر منابع بازیافتی در روسازی‌های بتنی به‌جهت تحقیقات و آزمایش‌های انجام گرفته در این خصوص، عملکرد بهتری برای این نوع روسازی‌ها در نظر گرفته می‌شود (چراغی، ۱۳۹۴، PIARC, 2005, PIARC, 2007).

• عملکرد سازه‌ای رویه:

عملکرد سازه‌ای روسازی به‌شرایط فیزیکی آن، مانند بروز ترک و گسیختگی مربوط می‌شود که می‌تواند بر توانایی باربری سازه اثر بگذارد. عمر یا دوره‌ی بهره‌برداری شامل مدت زمانی است که

جدول ۴ - رتبه‌بندی گزینه‌های مورد نظر با روش‌های تحلیل چند معیاره‌ی مرسوم

جمع وزنی ساده	برنامه‌ریزی سازشی			تاپسیس	میانگین وزنی مرتب (با کمیت‌سنج بخشی)							شبهه‌های روسازی
	P				کمینه یک معیار	کمی از معیارها	برخی از معیارها	نیمی از معیارها	بیش‌تر معیارها	اکثر معیارها	همه‌ی معیارها	
	۱۰	۲	۱									
۴	۴	۴	۴	۴	۲	۴	۴	۴	۴	۴	۳	آسفالت قیری
۳	۲	۳	۳	۳	۱	۳	۳	۳	۳	۲	۲	آسفالت متخلخل
۲	۳	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۳	۳	بتن غلتکی
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	بتن اسفنجی

دست آمد: بتن اسفنجی، بتن غلتکی، آسفالت متخلخل و آسفالت قیری.

درصد مزیت بتن اسفنجی نسبت به بقیه‌ی رویه‌ها با استفاده از نتایج روش‌های تحلیل چندمعیاره به‌طور میانگین به‌صورت زیر می‌باشد:

نسبت به بتن غلتکی ۱۵۴/۸۸ درصد

نسبت به آسفالت متخلخل ۱۶۷/۵۹ درصد

نسبت به آسفالت قیری ۲۸۰/۱۶ درصد.

مقدار ناهمواری سطح جاده، میزان سوخت از بین رفته‌ی ناشی از تغییر وضعیت خودرو کم می‌شود و کیفیت سطح جاده و بنابراین، سلامت روانی اشخاص، بهبود می‌یابد.

### ۳- نتایج

#### • رتبه‌بندی گزینه‌ها

روش‌های روسازی با استفاده از معیارهای مطرح شده رتبه‌بندی می‌گردد که نتایج آن در جدول ۴ آمده است. مطابق جدول ۴، بتن اسفنجی به‌عنوان مناسب‌ترین و آسفالت قیری به‌عنوان نامناسب‌ترین روش مشخص می‌شود. در بخش همه‌ی معیارها و اکثر معیارها در روش میانگین وزنی مرتب، بتن غلتکی و آسفالت متخلخل جابجا شده‌اند و در بخش کمینه یک معیار از همین روش نیز تنها رتبه‌بندی ۱ و ۲ به‌دست آمده است اما در بقیه‌ی موارد، همواره رتبه‌بندی‌ها مشابه یک‌دیگر می‌باشد و بتن اسفنجی در صدر گزینه‌ها قرار دارد.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره به روش‌های جمع وزنی ساده، تاپسیس، برنامه‌ریزی سازشی و عملگر میانگین وزنی مرتب از بین گزینه‌های پیش روی روسازی در ایران، مطلوب‌ترین گزینه از منظر آلودگی هوا در بعد سلامت جسمی و سلامت روانی مشخص و ارایه شد.

نتیجه‌ی پژوهش، نشانگر این مطلب است که بتن اسفنجی جهت روسازی شهری با دارا بودن انطباق بیش‌تر با راه سبز به‌عنوان بهترین گزینه در میان گزینه‌های مطرح می‌باشد و با دریافت بالاترین امتیازها در میان معیارهای مطرح، فاصله‌ی بسیار مناسبی را نسبت به دیگر گزینه‌ها به‌دست آورده است.

مطابق این پژوهش، روش روسازی مرسوم مورد استفاده در ایران یعنی آسفالت قیری، نامناسب‌ترین روش به‌شمار می‌رود. همچنین، اولویت به‌کارگیری شیوه‌های روسازی در کشور بدین ترتیب به-

## ۵- یادداشت‌ها

- ۱- Sheet Asphalt = آسفالت صفحه‌ای
- ۲- Heavy Duty Asphaltic Mixture = مخلوط آسفالت با درجه‌ی خدمت بالا
- ۳- Porous Asphalt = آسفالت متخلخل
- ۴- IRCC = بتن غلتکی
- ۵- Foam Concrete = بتن اسفنجی
- ۶- Sustainable Development = توسعه‌ی پایدار
- ۷- Adaptive Planning = برنامه‌ریزی سازشی
- ۸- Topsis = تاپسیس
- ۹- MCDM: Multi Criteria Decision Making = شیوه‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره
- ۱۰- Weighted Sum = جمع وزنی ساده
- ۱۱- Ordered Weighted Averaging Operation = عملگر میانگین وزنی مرتب
- ۱۲- AERMOD = یک همانندساز هواشناسی
- ۱۳- EPA = سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده‌ی امریکا
- ۱۴- PSI = نشانه‌ی خدمت‌دهی فعلی

## ۶- منابع

- اشرفی، خ، سلیمان، م، مؤمنی، م، کرمی، ش، امینی، ا، ۱۳۹۲. «مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های ناشی از کارخانه‌ی آسفالت و دستگاه سنگ‌شکن پروژه‌های راه‌سازی (مطالعه‌ی موردی باند دوم محور سراب- بستان‌آباد)». مهندسی حمل و نقل، سال چهارم، شماره‌ی چهارم، صص ۳۱۳ - ۳۳۲.
- اکبری، ع، برهان دینانی، س، ۱۳۹۰. «ارزیابی گازهای آلاینده‌ی خروجی از کارخانه‌ی بهبهان و مقایسه‌ی آن با استاندارد»، اولین کنفرانس برنامه‌ریزی زیست‌محیطی، همدان، دانشگاه آزاد اسلامی همدان، صص ۱ - ۸.
- الماسی، ع، اسدی، ف، محمدی، م، فرهادی، ف، عطاقر، ز، خاموپیان، ر، محمدی، ا، ۱۳۹۲. «بررسی میزان آلاینده‌های خروجی از دودکش کارخانه‌ی سیمان سامان کرمانشاه در سال ۹۰ و ۹۱»، بهداشت در عرصه، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، دانشکده‌ی بهداشت، دوره‌ی ۱، شماره‌ی ۲، صص ۳۶ - ۴۳.
- پاشا، ع، ۱۳۸۹. «مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی روسازی بتنی»، ساخت شهر، شماره‌ی ۱۳، صص ۴۸ - ۵۴.
- پیدایش، م، رضانبیان‌پور، ع، جعفری ندوشن، م، ۱۳۸۸. «مزایا و بررسی‌های فنی و اقتصادی روسازی‌های بتنی»، انجمن بتن ایران، صص ۵۱ - ۶۵.
- چراغی، ع، ۱۳۹۴. «ارزیابی اثرات آلودگی هوای سه روش روسازی آسفالت متخلخل، بتن غلتکی و بتن اسفنجی به کمک دو روش برنامه‌ریزی سازشی و تاپسیس»، نخستین کنگره‌ی بین‌المللی جامع محیط‌زیست، مرکز همایش‌های بین‌المللی توسعه‌ی ایران، تهران، آذرماه.
- حامی، احمد، ۱۳۸۲. «مصالح ساختمانی»، چاپ چهاردهم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- ساریچی اوغلو، خ، ۱۳۹۱. «کاربرد سیمان با افزودنی معدنی پر حجم در بتن روسازی جاده»، ترجمه از نشریه‌ی دنیای سیمان و بتن ترکیه، ترجمه و تلخیص دفتر تحقیقات شرکت سیمان فرآوران گرمسار، ماهنامه‌ی تخصصی سیمان، بتن و بنا، خرداد و تیرماه، شماره‌ی ۳، صص ۲۲ - ۲۴.
- ضرغامی، م، عنبری، م، چراغی، ع، ۱۳۹۰. «مقایسه‌ی روش‌های باروری ابرها در ایران به کمک تصمیم‌گیری چندمعیاره»، نهمین کنگره‌ی بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، اردیبهشت‌ماه.
- علیخانی، م، ۱۳۹۲. «مقایسه‌ی روسازی‌های بتنی و آسفالتی»، انجمن بتن ایران، صص ۴۷ - ۵۲.

- علیزاده داخل، ا.، قوی دل، آ.، پناهنده، م.، ۱۳۸۹. «مدل CFD از ذرات معلق منتشره از کارخانه‌ی سیمان کرمان»، سلامت و محیط‌زیست، صص ۶۷ - ۷۴.
- نشریه‌ی شماره‌ی ۲۴۳ وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۰. آیین‌نامه‌ی روسازی آسفالتی راه‌های ایران، تجدید نظر اول.
- Collins, I. F., 2007. "Modelling the behaviour of soils and granular materials", Reviews in geomechanics, Chapter 3, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University in Prague, India, 103-124.
- Gelim, Khalid Ali, M., 2011. "Mechanical and physical properties of fly ash foamed concrete", Degree of master thesis, University Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM).
- Jones MR. & McCarthy A., 2005. "Utilising unprocessed low-lime coal ash in foamed concrete", Fuel, 84:1398-1409.
- Krishnan, J. M., Rajagopal, K. R., 2007. Reviews in geomechanics, Chapter 1, "The physical and chemical structure of asphalt: with a brief history of their usage and availability", Faculty of Mathematics and Physics, Charles University in Prague, India, 1-13.
- Lee Kun, G., 2010. "Performance of foamed concrete using laterite as sand replacement", Degree of bachelor thesis, Universiti Malaysia Pahang.
- Liu, Q., 2012. "Induction Healing of Porous Asphalt Concrete", PhD thesis, Delft University of Technology (TU delft).
- Mo, L.T., 2010. "Damage development in the adhesive zone and mastic of porous asphalt concrete", Ph.D thesis, Delft University of technology, the Netherlands.
- Neithalath, N., 2003. "Development and characterization of acoustically efficient cementitious materials", Ph.D. thesis, Purdue University, West Lafayette, India.
- PIARC, 2007. "Porous asphalt", Report of the TC4-3 committee, Department of Secretariat of the World Assembly (PIARC), Assistance of Education, Research and Technology, Transportation Ministry, IRAN.
- PIARC, 2005. "The use of roller compacted concrete for roads", Report of the TC4-3 committee, Department of Secretariat of the World Assembly (PIARC), Assistance of Education, Research and Technology, Transportation Ministry, IRAN.
- Rao, p.k., 2000. "Sustainable Development: economics and policy", Oxford, UK: Blackwell.
- Ramamurthy, K.; Kunhanandan Nambiar, E.K. & Indu Siva Ranjani, G., 2008. "A classification of studies on properties of foam concret", Published by Elsevier Ltd, Volume 31, Issue 6, 388-396.
- Shen, Sh., Burton, M., Jobson, B. & Haselbach, L., 2012. "Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment", Published by Elsevier Ltd, Construction and Building Materials 35, 874-883.
- Taylor, G.W., Farrel, P. & Woodside, A., 2002. "Additional analysis of the effects of pavement structure on truck fuel consumption", Government of Canada Action Plan 2000 on Climate Change Concrete Roads Advisory Committee.
- Tennis, P., L. Leming, M. & J. Akers, D., 2004. "Pervious concrete pavements", Portland Cement Association.
- Smith, T., 2006. "A life cycle perspective on concrete and asphalt roadways: Embodied primary energy and global warming potential", Submitted to Cement Assosiation of Canada, Athena Institute, Ottawa, Ontario.
- Smith, T., Maillard Louis, PThe, 2007. "Sustainable benefits of concrete pavement", 42th congres annuel de l'AQTR defi: Transport Durable, Montreal.