

تأثیر حرکات شناورها در انتخاب مسیر حمل و نقل دریایی*

روزبه پناهی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

محمد سعید سیف، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

E-mail: roozbeh_panahi@yahoo.com

چکیده

یافتن مناسب ترین مسیر در حمل و نقل های دریایی همواره از اهمیت بسیاری برخوردار بوده است. در حمل و نقل دریایی، مناسب ترین مسیر، لزوماً کوتاه ترین مسیر نبوده و متغیرهای مختلفی مثل ایمنی، مقدار سوخت مصرفی و ... با درجات اهمیت متفاوت در این تصمیم گیری نقش ایفا می کنند. به بیان دیگر، تنها با برقراری حالت بهینه ای از تمامی متغیرهای تأثیر گذار، مسیر بهینه مشخص می شود و در طول زمان احتمال تغییر آن وجود دارد. آشکار است که تخمین رفتار شناور در امواج و تحلیل آنها بر اساس معیارهای حرکت شناور، نقش بی بدیلی در راستای انتخاب مسیر مناسب ایفا می کند.

این مقاله به بیان جایگاه بررسی رفتار شناور در انتخاب مسیر حرکت پرداخته و با بیان روش کلی اعمال محدودیت های حرکت، از دو معیار شتاب قائم در پل فرماندهی و غلنث عرضی به منظور تحلیل حرکات استفاده نموده است. بر این اساس می توان به صورت مستمر، مسیر حرکت مناسب شناور در طی ساعات پیش رو را تشخیص و نهایتاً موجبات صرفه جویی در مصرف سوخت و سرعت در حمل و نقل را در عین حفظ ایمنی و برآورده شدن معیارهای حرکت فراهم آورد.

واژه های کلیدی: امواج دریا، انتخاب مسیر، حرکات کشتی، معیارهای حرکت

۱. مقدمه

زمان حمل و نقل که بسته به استراتژی کاری با وزنهای مختلف در تابع هدف ظاهر می شوند. بدیهی است که داشتن اطلاعات کامل از رفتار شناور در دریا از ملزومات اساسی بهینه سازی مسیر است که در دو بخش کاهش غیر ارادی سرعت ناشی از افزایش مقاومت و کاهش ارادی سرعت به واسطه خروج از محدوده های مجاز حرکت ظاهر می شود.

بررسی حرکت شناور در دریا نیازمند حل معادلات اساسی حرکت است. نخستین کارها در این زمینه، براساس روش نواری^۱ برای به دست آوردن ضرایب معادلات حرکت شناور توسط تاسای (Tasai, 1959) انجام پذیرفت و در ادامه گریتسما (Gerritsma)

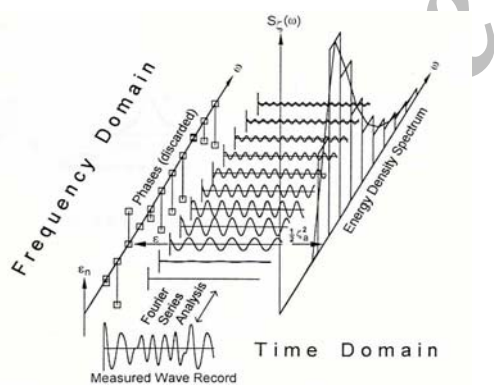
مسیر حرکت شناور، همواره به گونه ای طراحی می شود که مسافت مورد نظر را با حداکثر سرعت در عین حفظ ایمنی طی کند. این کار براساس نقشه ها و پیش بینی های آب و هوایی در مسافتهای بیش از ۲۸۰۰ کیلومتر [۱]، که محدودیت انتخاب مسیرهای متفاوت وجود نداشته باشد (آبهای نامحدود) اثر خود را بر روی زمان و هزینه ها نشان می دهد. به این ترتیب با بررسی پیوسته مسیر حرکت و بر اساس اطلاعات جدید آب و هوایی، امکان تغییر مسیر در راستای بهینه نگه داشتن تابع هدف از پیش تعیین شده وجود خواهد داشت. عوامل تأثیر گذار در تابع طراحی مسیر به طور کلی عبارتند از: ایمنی، آسایش، سوخت مصرفی و

بررسی حرکت شناور در دریا را می توان به طور مشخص به سه مرحله تقسیم نمود:

- ۱- تخمین محیط دریا (طیف موج)،
- ۲- محاسبه پاسخ شناور (طیف حرکت)،
- ۳- اعمال معیارهای حرکت شناور در دریا و تحلیل حرکات دقت در مدل سازی محیطی که شناور با آن مواجه می شود و اعمال فرضیات مناسب برای رسیدن به پاسخ شناور (موارد یک و دو)، در تحلیل رفتار شناور (مورد سه) اثر قابل توجهی دارند.

۲. امواج دریا

امواج دریا نامنظم بوده و طبیعتی تصادفی دارند. در بررسی رفتار شناور در دریا با فرض برقراری اصل برهم نهی، امواج نامنظم به صورت ترکیبی از امواج منظم (طیف موج) فرض می شوند و به این ترتیب با شبیه سازی سطح دریا، حرکت شناور در مواجهه با امواج منظم بررسی شده و در نهایت از جمع آثار در رسیدن به پاسخ شناور در دریا استفاده می شود. به بیان دیگر، نتایج حوزه زمان به کمک تحلیل فوریه به حوزه فرکانس تبدیل می شود (شکل ۱).



شکل ۱. تبدیل حوزه زمان به حوزه فرکانس [۲]

طیفهای استاندارد در این زمینه تهیه گردیده است که می توان با توجه به شرایط آب و هوایی و منطقه مورد نظر، به طور مستقیم از آنها بهره گرفت. برخی از معروفترین این طیفها عبارتند از [۲]:

- طیف ITTC یا برتشنايدر (Bretshneider)
 - طیف JONSWAP
 - طیف Neumann
- عبارات کلیدی که در ارتباط با این طیفها مطرح می شود، عبارتند از:

(1967, سالوسن (Salvesen, 1970) و اشمیتک (Schmithec) (1979) رویکردهای مختلفی در این زمینه ارائه کردند [۲]. در سالهای اخیر تئوری روش نواری تغییر چندانی نکرده و برنامه های تجاری زیادی براین اساس نوشته شده است که موضوع مشترک آنها، کار بر روی سرعت و دقت پاسخ است. همراه با گسترش توان سخت افزاری و نرم افزاری کامپیوترها، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به منظور محاسبه مستقیم نیرو و ممان های وارد بر شناور و حل معادلات حرکت نیوتن، موضوع اصلی کارهای تحقیقاتی در این زمینه بوده است. این کار با بیان امکان استفاده از روشهای مختلف، در بررسی جریان لزوج اطراف شناور آغاز شد [۳] و با کاربرد این روشها در برخی جنبه های ساده تر، مثل بررسی دینامیکی تریم (Trim) شناور پیش رفت [۴]. در آغاز، تحقیقات معمولاً بر روی حالت پایدار حرکت شناور انجام می شدند [۵]، اما با تجربه های کسب شده و پیشرفت امکانات، موضوع تحقیقات به سمت حالت ناپایدار با درجات آزادی کمتر گسترش داده شد [۶ و ۷] و در نهایت حرکات شناور با شش درجه آزادی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۸ و ۹ و ۱۰]. به این ترتیب و در طول زمان از روشهای متفاوتی برای بررسی رفتار شناور استفاده گردیده است که می توان آنها را به صورت کلی به سه دسته تقسیم نمود:

- اندازه گیری حرکات شناور ساخته شده در ابعاد واقعی
 - انجام آزمایش بر روی مدل شناور در آزمایشگاه
 - روشهای عددی و مدلسازی حرکات شناور
- هر یک از روشهای یاد شده با محدودیتها و مشکلات خاص خود مواجهند. روشهای عددی اگر چه تا حدودی به نتیجه آزمایشگاهی وابستگی دارند، اما دقت قابل قبول و هزینه بسیار کمتر کار با آنها، بر مقبولیت این روشها افزوده و مسیر تحقیقات در این راستا، بر اساس دو مدل کلی زیر در حال توسعه است:
- مدل تابع پتانسیل (به کمک روشهای المان مرزی [۱۱]) و تئوری نواری [۲].
 - مدل Reynolds Averaged Navier- (RANSE) Stokes Equations (به کمک روشهای حجم محدود (Finite Volume) [۱۱]).

این مقاله با بیان روشهای کلی بررسی حرکات شناور به اعمال برخی از محدودیتهای حرکت بر روی شناور Hollandia پرداخته و نشان می دهد که برای حفظ ایمنی و آسایش در شرایط مختلف دریایی، تغییر سرعت و جهت حرکت چه نقشی ایفا می کند.

عرضی^۵ و حرکت طولی^۶ معمولاً به صورت مستقل در نظر گرفته می شوند.



شکل ۲. شناور به عنوان یک عملگر

برای مثال معادلات کوپل حرکت قائم و غلتش طولی (حرکات صفحه قائم) به ترتیب با روابط (۱) و (۲) بیان می شوند:

$$(m + a_{33})\ddot{x}_3 + b_{33}\dot{x}_3 + c_{33}x_3 + a_{35}\ddot{x}_5 + b_{35}\dot{x}_5 + c_{35}x_5 = F_{30}\sin(\omega_e t + \alpha_3) \quad (1)$$

$$a_{53}\ddot{x}_3 + b_{53}\dot{x}_3 + c_{53}x_3 + (I_{55} + a_{55})\ddot{x}_5 + b_{55}\dot{x}_5 + c_{55}x_5 = F_{50}\sin(\omega_e t + \alpha_5) \quad (2)$$

در این روابط، زیر نویس ۳ معرف راستای حرکت قائم و ۵ معرف راستای غلتش طولی هستند. به علاوه a_{ij} جرم افزوده، b_{ij} میرایی، c_{ij} ضریب سختی، I_{ij} ممان افزوده، F_i دامنه نیروی موج وارد بر شناور، ω_e فرکانس برخورد موج و α تاخیر فاز است.

برای اعمال محدودیتهای حرکت نیاز به دانستن حرکات شناور در نقاط مختلف (مثل پل فرماندهی) است، در حالی که معادلات حرکت برای یک نقطه از شناور حل می شوند. برای انتقال جابه-جایی x_p ، سرعت \dot{x}_p و شتاب \ddot{x}_p به یک نقطه خاص مانند $p(x_p, y_p, z_p)$ به صورت زیر عمل می شود [۱]:

$$x_p = x - y_p \psi + z_p \theta \quad (3)$$

$$\dot{x}_p = \dot{x} - y_p \dot{\psi} + z_p \dot{\theta} \quad (4)$$

$$\ddot{x}_p = \ddot{x} - y_p \ddot{\psi} + z_p \ddot{\theta} \quad (5)$$

• $H_{1/3}$ یا ارتفاع مشخصه موج: میانگین یک سوم بیشترین ارتفاع موجها است.

• T_z (Zero-Crossing Period) یا پرپود مشخصه موج: فاصله بین دو نقطه متوالی سری زمانی موج که محور صفر را قطع کرده و به طرف بالا یا پائین می روند می باشد.

شرایط مختلفی در دریا اتفاق می افتد که می توان آنها را براساس مقادیر ارتفاع مشخصه و پرپود مشخصه از هم جدا نمود. ثبت این شرایط (مشابه جدول ۱) در انتخاب مناسب شرایط کاری (انتخاب $H_{1/3}$ و T_z)، با توجه به احتمال وقوع آنها کارساز خواهد بود. به این ترتیب و با در دست داشتن این دو عدد، می توان طیف موج مناسبی را مشخص و تأثیر آن بر شناور را بررسی کرد.

به عبارت دیگر، هر کدام از این نوع جداول بیانگر احتمال وقوع یکی از شرایط دریایی (با ارتفاع و پرپود مشخصه آن)، در مکان و زمان مشخص است.

جدول ۱. نمونه جداول آماری برای شرایط دریا [۱]

Total	0	1	10	73	210	286	236	120	50	14	0	1000
>14												0
13-14									1	1		2
12-13								1	1	1		3
11-12								1	2	1	1	5
10-11					1	2	2	2	2	1		8
9-10					2	4	4	4	2	1		13
8-9					1	3	6	7	4	1		22
7-8					2	6	11	10	5	2		36
6-7					4	12	19	14	8	2		59
5-6					1	8	24	31	22	8	2	96
4-5					2	17	43	44	25	8	2	141
3-4					6	37	66	53	14	6	1	183
2-3					1	16	63	76	46	14	3	220
1-2					4	33	66	49	17	4	1	174
0-1					1	5	15	12	4	1		38
Total												1000

مسئلاً انتخاب جدول مناسب با توجه به مکان کار سازه مورد نظر یا مسیر حرکت کشتی مورد طراحی صورت می پذیرد. در صورت نبودن آمار و اطلاعات منطقه مورد نظر، لازم است از اندازه گیری امواج برای یک بازه زمانی قابل قبول استفاده شود.

۳. پاسخ شناور

همان طور که در شکل ۲ دیده می شود، می توان شناور را می توان به صورت یک عملگر یک تابع انتقال این عملگر RAO^3 نام دارد، که برای هر درجه آزادی متفاوت بوده و باید به نحو مناسبی به دست آید. در حالت کلی تمامی درجات آزادی با هم کوپل بوده و بر روی هم مؤثرند. اما در عمل و در حالتی که شناور مقارن باشد، بسیاری از این اثرات قابل صرف نظرند. به این ترتیب حرکات صفحه قائم^۴، حرکات صفحه

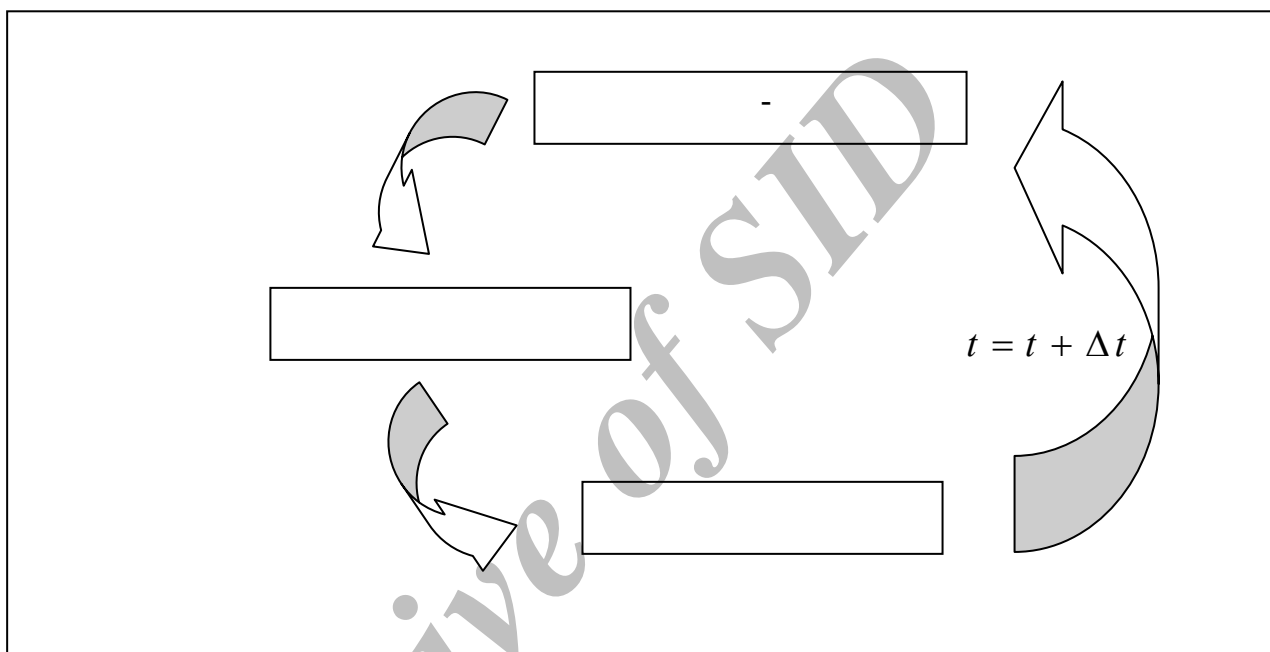
پناهی و سیف

حرکت خطی و زاویه‌ای موقعیت جدید شناور محاسبه می‌شود (شکل ۳).

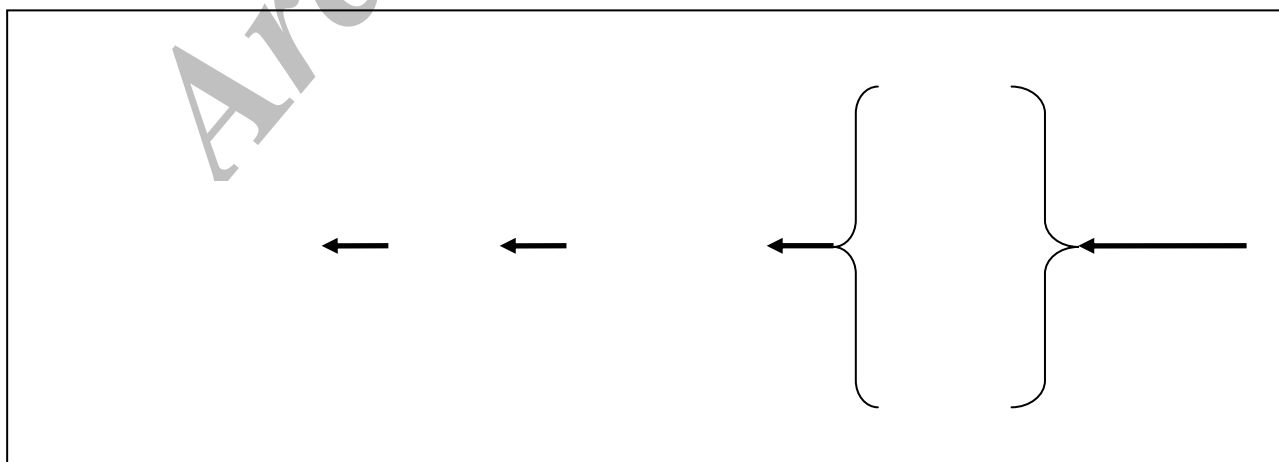
روشهای حوزه فرکانس ساده تر بوده و به محاسبات کمتری نیاز دارند. بیشتر این روشها از تئوری نواری بهره می‌برند که با تبدیل شناور به مقاطع دو بعدی و با داشتن ضرایب این مقاطع، به انتگرال روی بدنه پرداخته و ضرایب معادلات حرکت را محاسبه می‌نمایند (شکل ۴).

که در این روابط θ غلتش طولی شناور و ψ دوران قائم است. دو روش اصلی تعیین رفتار و حرکات شناور (حل معادلات حرکت) عبارتند از:

- بررسی در حوزه زمان
 - بررسی در حوزه فرکانس
- در روشهای حوزه زمان، با گذشت زمان Δt به محاسبه نیروها و ممانهای وارد بر شناور پرداخته و به کمک معادلات تغییر اندازه



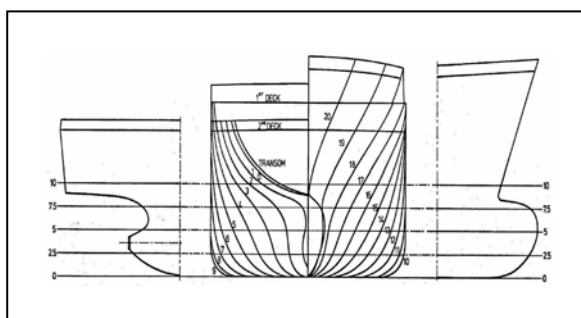
شکل ۳. بررسی رفتار شناور در طول زمان



شکل ۴. بررسی رفتار شناور در حوزه فرکانس (اساس روش نواری)

جدول ۲. مشخصات شناور کانتینربر Hollandia

L*B*T : 193.1* 30.8 * 10 m	ابعاد
35719 m ³	حجم غوطه وری
0.6006 [-]	ضریب ظرافت
0.9800 [-]	ضریب مقطع میانی
0.6129 [-]	ضریب منشوری
0.7811 [-]	ضریب منشوری
$k_{xx} = 12.3m, k_{yy} = 48.275m,$ $k_{zz} = 48.275m$	شعاع ژیراسیون



شکل ۵. خطوط بدنه و مقاطع شناور Hollandia

برای انجام محاسبات، امواج دریا به صورت طیف موج Neumann با رابطه (۶) در نظر گرفته شده‌اند:

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{3832 H_{1/3}^2}{T_z} \cdot \omega^{-6} \cdot \exp\left\{ \frac{-69.8}{T_z^2} \cdot \omega^{-2} \right\} \quad (6)$$

که در این رابطه ω فرکانس موج و $S_{\zeta}(\omega)$ طیف موج است. همان طور که دیده می‌شود، رابطه (۶) یک طیف موج دو متغیره است، بدین معنا که با داشتن دو عدد ارتفاع و پریرود مشخصه موج، به ازای فرکانس‌های مختلف، یک طیف موج را ایجاد می‌کند.

برای بررسی رفتار شناور در دریا معمولاً طیف حرکت شناور محاسبه می‌شود. در این قسمت با فرض این که شناور کانتینر بر با سرعت ۱۰ نات حرکت و با زاویه ۱۳۵ درجه با امواجی در شرایط دریایی $H_{1/3} = 10.25m, T_z = 10.50s$ برخورد کند، طیف شش درجه آزادی حرکت شناور که با رابطه (۷) تعریف می‌شود، رسم شده است.

بیشتر نرم افزارهای تجاری بر اساس حوزه فرکانس نوشته شده و روشهای مبتنی بر حوزه زمان بیشتر جنبه تحقیقاتی دارند.

۴. معیارهای بررسی حرکات

معیارهای بررسی حرکات، در واقع محدوده قابل قبول حرکت را که محدودیتی برای انجام مأموریت شناور ایجاد نکند، تعیین می‌کنند. اساس این محدودیتها، تضمین آسایش ایمنی و عدم خسارت به شناور است.

برخی از این معیارها عبارتند از:

دامنه مطلق حرکت

- زاویه غلتش عرضی
- زاویه غلتش طولی
- جابه‌جایی قائم نقاط روی عرشه
- سرعت و شتاب مطلق

- دریا غلتش عرضی
- اسلמיگ (slamming)

حرکات نسبی

- خروج پروانه کشتی از آب
- آب گرفتگی عرضه کشتی

۵. نتایج عددی

در این قسمت با هدف روشن تر شدن بحث، با استفاده از نرم افزار SEAWAY (نرم افزار حوزه فرکانسی) و برنامه نوشته شده، محاسباتی بر روی یک شناور کانتینربر Hollandia انجام گرفته و نتایج آن ارائه شده است [۱۳، ۱۴]. نرم افزار SEAWAY یک برنامه کامپیوتری محاسبه حرکات شناور در شش درجه آزادی است که بر اساسی تئوری نواری تهیه شده است. این برنامه مبتنی بر فرض تابع پتانسیل بوده و برای عمق مختلف آب نیز قابل استفاده است. در استفاده از این برنامه با انتخاب طیف موج اعمالی به شناور، سرعت و جهت حرکت شناور و وارد کردن نقاط مورد نظر شناور که نیاز به انجام محاسبه در آنها وجود دارد، کار پیش می‌رود.

مشخصات اصلی شناور کانتینربر Hollandia که محاسبات بر روی آن انجام شده است، در جدول ۲ ارائه شده و خطوط بدنه شناور نیز در شکل ۵ نمایش داده شده است.

می‌شود. این اتفاق، با خروج کامل سینه شناور و برخورد مجدد با امواج اتفاق می‌افتد (شکل ۸ و جدول ۳) و پیامد آن، تغییر فشار محلی بر روی ورقه بدنه و ارتعاش داخلی است که در خستگی سازه تأثیرگذار است. فشار ضربه ای اسلیمینگ تحت تأثیر عوامل زیادی است. برخی از آنها عبارتند از: شکل بدنه در محل برخورد، سرعت نسبی بین شناور و آب، زاویه نسبی بین کیل شناور (keel) و آب، انعطاف پذیری محلی ورق کف بدنه و انعطاف پذیری سازه شناور [۱۳]. اوچی (Ochi 1964) و کنولی (Conolly, 1974) دو معیار مختلف برای بررسی اسلیمینگ پیشنهاد داده‌اند. تفاوت این دو تعریف در وارد نمودن نقش سرعت پیشروی شناور و تعریف سرعت بحرانی شناور است. با فرض اینکه $S = \zeta_{xb} - z + x_b \theta$ جابه‌جایی نسبی قائم شناور و $\zeta_{xb} = \zeta_a \cos(\omega_e t - x_b k \cos \mu)$ پروفیل موج باشد (شکل ۸)، با توجه به نقش سرعت پیشروی V ، سرعت نسبی به صورت رابطه (۸) در تعریف اوچی و رابطه (۹) در تعریف کنولی می‌باشد [۱۳]:

$$\dot{S} = \dot{\zeta}_{xb} - \dot{z} + x_b \cdot \dot{\theta} + V \cdot \theta \quad (8)$$

با معیار سرعت بحرانی $\dot{S}_{cr} = 0.0928 \sqrt{gL}$ و

$$\dot{S} = \dot{\zeta}_{xb} - \dot{z} + x_b \cdot \dot{\theta} \quad (9)$$

$$\dot{S}_{cr} = \sqrt{\frac{2P_{cr}}{\rho c_p}} \quad \text{با معیار سرعت بحرانی}$$

به این ترتیب احتمال وقوع اسلیمینگ با رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$P\{slam\} = P\{S_a > D_s\} \cdot P\{\dot{S}_a > \dot{S}_{cr}\} \quad (10)$$

که در این رابطه $(S @ 0.9L)$ و S_a و D_s آب‌خور شناور است.

به بیان دیگر رابطه (۱۰) احتمال وقوع اسلیمینگ را با وقوع دو شرط گذر از سرعت بحرانی و خروج سینه شناور از آب پیش بینی می‌کند:

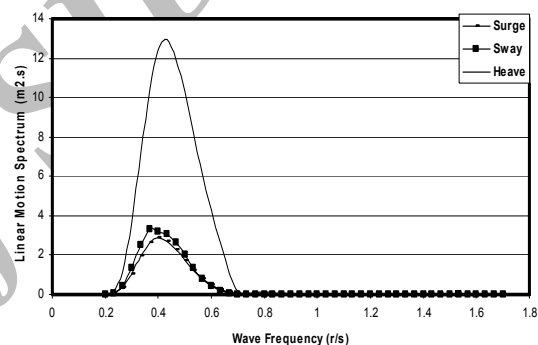
$$(11)$$

احتمال وقوع اسلیمینگ = احتمال گذر از سرعت بحرانی

× احتمال خارج شدن سینه شناور

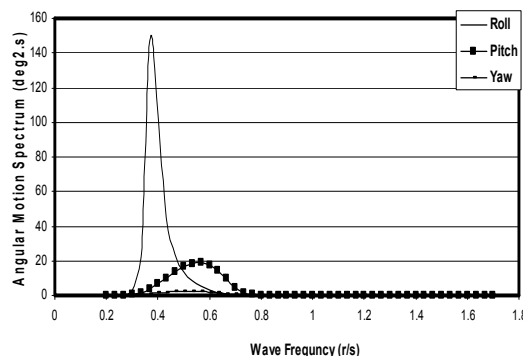
$$S_x(\omega) = \left(\frac{x_a}{\zeta_a}\right)^2 \cdot S_\zeta(\omega) \quad (7)$$

که در این رابطه x_a دامنه حرکت، ζ_a دامنه موج و $S_x(\omega)$ طیف حرکت است. اشکال ۶ و ۷ نتایج به دست آمده برای حرکات را با توجه به رابطه (۷) نمایش می‌دهند. همان طور که دیده می‌شود، حرکات قائم و غلتش عرضی شناور بیشترین مقادیر را در بین طیفهای حرکت دارند. از طرفی فرکانس بیشینه طیف حرکات خطی تقریباً در یک محدوده $(0/35 - 0/45 \text{ r/s})$ واقع شده‌اند. حرکت غلتش قائم شناور نیز همان گونه که از قبل نیز قابل پیش بینی بود، با توجه به جهت برخورد امواج کمترین اثر را در بین درجات آزادی شناور داراست.



شکل ۶. نمودارهای طیف حرکات خطی شناور

در زاویه برخورد ۱۳۵ درجه



شکل ۷. نمودارهای طیف حرکات زاویه ای شناور

در زاویه برخورد ۱۳۵ درجه

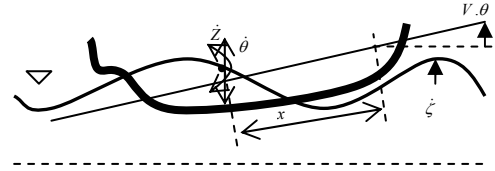
با چنین اطلاعاتی در رابطه با حرکات شناور در امواج و با اعمال محدودیتهای حرکت، تصمیم گیری های اساسی در رابطه با مسیر حرکت اتخاذ می‌شود. برای مثال اسلیمینگ، یکی از مهم ترین معیارهای بررسی عملکرد شناور در دریا است که بیشتر شدن آن از تعداد مجاز موجب تغییر سرعت و جهت حرکت شناور

تأثیر حرکات شناورها در انتخاب مسیر حمل و نقل دریایی

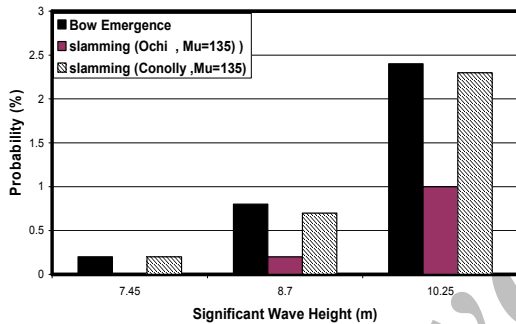
- تغییر جهت شناور در برخورد با امواج از وقوع اسلمینگ می‌کاهد.
- احتمال وقوع اسلمینگ پیش بینی شده توسط معیار کنولی در شرایط دریایی مشابه، بیش از مقدار پیش بینی شده با معیار اوچی است (ناشی از در نظر گرفتن اثر سرعت پیشروی در تعریف اسلمینگ)

لازم به ذکر است که خروج سینه شناور از آب به تنهایی عامل وقوع اسلمینگ نبوده و به عبارت دیگر وقوع همزمان آن با رسیدن به معیار بحرانی سرعت (که بر اساس سرعت و یا فشار تعریف می‌شود (جدول ۳)، اسلمینگ را ایجاد می‌کند. این موضوع در شکل ۱۱، با مقایسه احتمال خارج شدن سینه شناور از آب و وقوع اسلمینگ با دو معیار اوچی و کنولی در زاویه برخورد ۱۳۵ درجه، برای شرایط دریایی، دیده می‌شود.

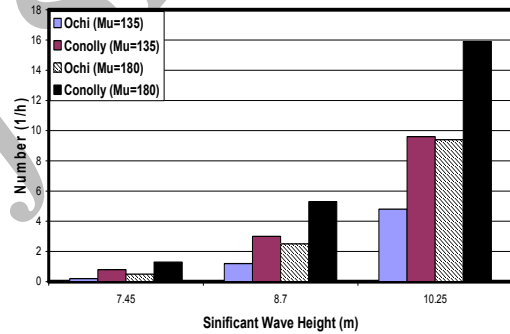
بر این اساس، وقوع اسلمینگ در دوازده شرایط دریایی مختلف، برای دو زاویه برخورد ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه برای شناور مورد نظر که با سرعت ۱۰ نات پیشروی می‌کند، محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند (شکل ۹ و ۱۰).



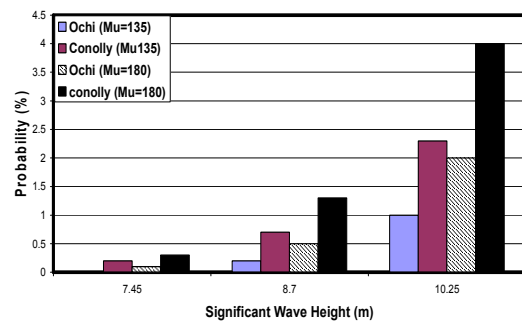
شکل ۸. جابه‌جایی نسبی شناور



شکل ۱۱. خارج شدن سینه شناور از آب و وقوع اسلمینگ در زاویه برخورد ۱۳۵ درجه



شکل ۹. تعداد اسلمینگ



شکل ۱۰. احتمال اسلمینگ

جدول ۳. برخی محدودیت‌های حرکت شناور [۲]

حرکت	شناور تجاری	شناور جنگی	شناور تندرو کوچک
شتاب قائم در عمود سینه RMS	۰/۲۷g (طول < ۱۰۰) ۰/۰۵g (طول > ۳۰)	۰/۲۷g	۰/۶g
شتاب قائم در پیل RMS فرماندهی	۰/۱g	۰/۲g	۰/۲۷g
شتاب عرضی RMS	۰/۱۲g	۰/۱g	۰/۱g
غلشش عرضی RMS	۶ درجه	۴ درجه	۴ درجه
احتمال وقوع اسلمینگ	۰/۰۳ (طول < ۱۰۰) ۰/۰۱ (طول > ۳۰)	۰/۰۳	۰/۰۳
احتمال خیس شدن عرشه	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵

برخی از نکات قابل ذکر در رابطه با این نمودارها عبارتند از:

- اسلمینگ از شرایط دریایی با ارتفاع مشخصه حدود هفت متر آغاز می‌شود.
- وقوع اسلمینگ در زاویه برخورد ۱۸۰ درجه، در شرایط دریایی مشابه، بیش از زاویه ۱۳۵ درجه است.

۶. نتیجه گیری

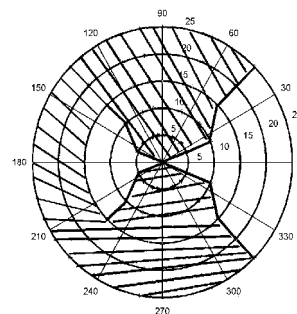
انتخاب مسیر مناسب حرکت شناور در دریا کار پیچیده‌ای است و نیازمند بررسی پیوسته شرایط و کسب اطلاعات محیطی است. این نوع تحلیل بی‌شک توان کامپیوتری بسیار و اطلاعات مناسب محیطی را می‌طلبد. در این بین، بررسی حرکات شناور در دریا که نقش مهمی در یافتن مسیر مناسب دارد، با توجه به ماهیت غیرخطی و نامنظم امواج، موضوعی پیچیده بوده و تلاش‌های بسیاری برای تدوین روش‌های قابل اطمینان در این خصوص صورت گرفته است.

به بیان دیگر، مدل سازی حرکت شناور در امواج و اعمال محدودیت‌های حرکت بر روی این رفتارها، با توجه به وزن عوامل مختلف در تابع هدف، تغییر مسیر را در راستای بر آوردن حداقل معیارهای حرکتی، در پی داشته و تصمیم‌گیری در انتخاب مسیر را سازماندهی می‌کند.

مدل ارائه شده می‌تواند در صورت دسترسی به نتایج هواشناسی و دانستن رفتار شناور در هر یک از شرایط دریایی، به صورت مستمر برای ساعات حرکت پیش روی شناور، وضعیت را تجزیه و تحلیل نموده و سپس نتایج را ارائه کند. مسلماً این نتایج باید در یک حلقه بهینه سازی مورد بررسی قرار گیرد تا مسیر و سرعت حرکت برای بازه زمانی موردنظر تعیین شوند.

۷. مراجع

1. Journée, J.M.J. and Meijers, J.H.C. (1980) "Ship routing for optimum performance", transactions IME, 21 February 1980 Conference on Operation of Ships in Rough Weather.
2. Journee, J., Massie, W. (2001) "Offshore hydromechanics", 1st Ed, Delft University of Technology, www.ocp.tudelf.nl/mt/journee/Files.
3. Miyata, H., Sato, T. and Babo, N. (1987) "Difference solution of a viscous flow with free-surface wave about an advancing ship, Journal of Computational Physics", 72: pp.393-421.
4. Kajitani, H. and Kawashima, T. (1989) "Ships flow and resistance under sinkage and trim effect", Proceedings. International.



شکل ۱۲. اعمال محدودیت حرکت غلتش عرضی و شتاب قائم

$$\text{در شرایط دریایی } H_{\frac{1}{3}}=11.06m, T_z=13s$$

در شرایط دریایی بد، حرکات شدید شناور عملکرد افراد را محدود و در مواردی مختل می‌کند.

بر این اساس محدودیت‌هایی برای حرکات شناور در نظر گرفته می‌شود. نمونه این معیارهای حرکت در جدول ۴ دیده می‌شود. در اینجا، با حل معادلات حرکت برای مرکز جرم شناور در شرایط دریایی $H_{\frac{1}{3}}=11.06m, T_z=13s$ حرکات شناور به کمک نرم‌افزار SEAWAY محاسبه شده است. در ادامه و بر اساس رابطه (۵)، شتاب قائم پل فرماندهی با مختصات زیر محاسبه شده است:

$$X=25 \text{ متر از پاشنه شناور}$$

$$Y=\text{متر از خط تقارن شناور}$$

$$Z=15 \text{ متر از پاشنه شناور}$$

با در نظر گرفتن معیار محدودیت شتاب قائم $0.15g$ برای پل فرماندهی شناور و محدودیت حرکت غلتش عرضی ۶ درجه، نمودار قطبی سرعت (شکل ۱۲) برای محدوده سرعت ۰-۲۵kn و تمامی جهات رسم شده است.

بخش‌های هاشور خورده شکل ۱۲، در واقع بیانگر جهت‌ها و سرعت‌هایی هستند که در صورت عملکرد در این حالت‌ها، محدوده‌های حرکتی انتخاب شده رعایت نمی‌شوند. دیده می‌شود که در برخی موارد تنها با تغییر جهت شناور نسبت به امواج و بدون نیاز به کاهش سرعت، امکان گذر از شرایط بحرانی وجود دارد.

این تغییر جهات و سرعتها با در نظر گرفتن تابع هدف انتخاب مسیر شناور توجیه پیدا می‌کنند و در برخی موارد به کاهش سرعت و در شرایط دیگر به تغییر جهت می‌انجامند.

10. Vogt, M., Hochbaum, A.C. (2002) "Numerical simulation of ship motions in head waves with a RANSE method", HSVA Report 1649, Hamburg, Germany.
11. Worbel, L., Aliabadi, M. (2002) "The boundary element method", John Wiley & Sons.
12. Ferziger, J., Peric, M. (1996), "Computational methods for fluid dynamics", Springer Verlag.
13. Journee, J. (2001) "Theoretical manual of SEAWAY", Release 4.19, www.ocp.tudelf.nl/mt/journee.
14. Journee, J. (2001) "User manual of SEAWAY", Release 4.19, www.ocp.tudelf.nl/mt/journee.
5. Miyata, H., Zho, M., Watanabe, O. (1992) "Numerical study on a viscous flow with free surface about a ship in steady straight course by a finite volume method", Journal of Ship Research, Vol. 36, No. 4, pp. 332-345.
6. Hochbaum, A.C. (1994) "A finite volume method for turbulent ship flows", Ship Technology Research Schiffstechnik, Hamburg, Germany.
7. Alessandrini, B. and Delhommeau, G. (1994) "Simulation of three-dimensional unsteady viscous free surface flow around a ship model" International Journal of Numerical Methods for Fluids, Vol. 1, pp321-342.
8. Miyake, R., Kinoshita, T., Kagemoto, H. (2000) "Ship motions and loads in large waves", 23rd ONR Symposium. on Naval Hydrodynamics., Val de Reuil , France.
9. Azcueta, R. (2001) "Computation of turbulent free surface flow around ships and floating bodies", PhD Thesis, Technische Universitat Hamburg-Harburg.

پانویس ها:

- 1- Strip Theory
- 2- Boundary Element
- 3- Response Amplitude Operator
- 4- Heave, Pitch
- 5- Sway, Roll, Yaw
- 6- Surge

Archive of SID

مدل مکانیابی فرودگاه به روش جایگشت*

محمود صفارزاده، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
هیوا ژولیده، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد، تهران، ایران
امین میرزا بروجردیان، کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: saffar_m@modares.ac.ir

چکیده

مکانیابی نادرست فرودگاه‌ها یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در برخی فرودگاه‌ها با آن روبه‌رو هستیم، به گونه‌ای که در اثر این اشتباه صدمات جانی و مالی فراوانی به وقوع می‌پیوندد. در این پژوهش، با استفاده از مدل جایگشت (پرماتاسیون)، یک مثال مکانیابی فرودگاه شامل گزینه‌های مختلف، بر اساس وضعیت و کمیت شاخصهای آنها مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند و در نهایت، گزینه برتر انتخاب می‌شود.

بررسی و مقایسه گزینه‌ها با در نظر گرفتن تمامی پارامترها و معیارهای مؤثر در انتخاب گزینه مناسب، امکان پذیر می‌شود. هدف اصلی این تحقیق، دستیابی به یک مدل مکانیابی فرودگاه و ارزیابی آن با استفاده از نمونه‌های عملی است. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهند که می‌توان با استفاده از یک مدل منطقی و ریاضی، خطای انسانی در انتخاب را به حداقل ممکن رساند.

در حال حاضر، در مکانیابی فرودگاه‌ها به منظور یافتن گزینه برتر از تعداد محدودی شاخص استفاده می‌شود که امکان خطا به دلیل کم بودن شاخص‌ها وجود دارد و از سوی دیگر کلیه شاخص‌ها تماماً مورد مقایسه قرار نمی‌گیرند که خود این مسئله باعث افزایش خطا می‌شود. این در حالی است که با استفاده از این مدل می‌توان هم در زمان صرفه‌جویی کرد و هم به دلیل امکان توجه به همه معیارها، به طور همزمان میزان خطاها را به حداقل ممکن کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: فرودگاه، مکانیابی، جایگشت، مدل غیرجبرانی

۱. مقدمه

با توجه به این که تمام معیارهای مقایسه‌ای مکانیابی فرودگاه کمی نیستند، لازم است با ارایه یک مدل جامع که معیارهای کمی و کیفی را مورد مقایسه قرار می‌دهد، اولویت گزینه‌های مختلف را مشخص کرد.

عمده‌ترین معیارهایی که باید در مدل مکانیابی فرودگاه در نظر گرفته شوند، عبارتند از [۲]:

- فراهم کردن نیازهای مربوط به ایمنی فرودگاه، مانند در نظر داشتن موانع در محوطه‌های مجاور فرودگاه،
- توسعه آینده فرودگاه،

موقعیت یک فرودگاه می‌تواند اثرات گوناگونی بر کاربری‌ها و فعالیتهای پیرامون آن داشته باشد [۱]. این تأثیرات ممکن است اقتصادی، توسعه ای، بصری و ... باشند. یکی از اشکالات فرایند مکانیابی فرودگاه‌ها استفاده نکردن از کلیه پارامترهای مؤثر در مکانیابی است. هدف مدل حاضر آن است که به کمک آن طراحان و برنامه‌ریزان فرودگاه‌ها بتوانند با توجه به محدودیت‌های عملیاتی و مسائل اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی و با در نظر گرفتن لزوم بکارگیری فنون جدید بهره‌برداری، از بروز عوارض نامطلوب در اثر انتخاب محل نادرست فرودگاه پیشگیری کنند.

- اطمینان از کمترین تأثیر گذاری سوء انواع آلودگی‌های فرودگاه بر محیط زیست و ساکنین اطراف فرودگاه،
- تحلیل هزینه‌های اداری و نگهداری،
- دسترسی به سیستم حمل و نقل زمینی،
- طرح کاربری زمین،
- تحلیل اقتصادی ساخت،
- ارزیابی و تحلیل سود - هزینه،
- در نظر گرفتن شرایط جوی،
- امکان دسترسی به خدمات تأسیساتی لازم برای فرودگاه،
- ایجاد فاصله مناسب بین فرودگاه‌ها.

۲. تئوری مدل مکانیابی فرودگاه

به طور کلی در دهه‌های اخیر نظر محققین به مدل‌های چندمعیاره^۱ برای تصمیم‌گیری‌های پیچیده معطوف گردیده است. در این تصمیم‌گیری‌ها به جای استفاده از یک معیار سنجش بهینگی ممکن است از چندین معیار سنجش استفاده شود. این مدل‌های تصمیم‌گیری به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: مدل‌های چند هدفه^۲ و مدل‌های چند شاخصه^۳، از مدل‌های چند هدفه برای طراحی و از مدل‌های چند شاخصه برای انتخاب گزینه برتر استفاده می‌شود.

با توجه به این که در این تحقیق هدف انتخاب یک گزینه برتر است، بنابر این باید از مدل‌های چند شاخصه استفاده شود. مدل‌های چند شاخصه انتخاب‌گر بوده و به منظور انتخاب مناسب‌ترین گزینه از بین چند گزینه موجود به کار می‌روند.

برای پردازش اطلاعات یک مدل چند شاخصه از روش‌های متعددی استفاده می‌شود. یک دسته از این روش‌ها منشعب از مدلی مشهور به مدل غیرجبرانی^۴ است و دسته دیگر منشعب از مدل دیگری معروف به مدل جبرانی^۵ است.

الف - مدل جبرانی دربرگیرنده روش‌هایی است که مبادله در بین شاخص‌ها در آنها مجاز است، یعنی به طور مثال تغییری (احتمالاً کوچک) در یک شاخص می‌تواند توسط تغییری مخالف در شاخص (یا شاخص‌های) دیگر جبران شود.

ب- مدل غیرجبرانی شامل روش‌هایی می‌شود که در آنها مبادله در بین شاخص‌ها مجاز نیست، یعنی به‌طور مثال ضعف در یک شاخص توسط مزیت شاخص دیگر جبران نمی‌شود. بنابراین در این روش‌ها هر شاخص، مستقل از شاخص‌های دیگر، در تصمیم‌گیری مؤثر است. مزیت این روش‌ها سادگی آنها است که با فرایند تصمیم‌گیری و محدود بودن اطلاعات تصمیم‌گیرنده سازگار است. [۷]. کاربرد این روش‌های نسبتاً ساده به نوع تصمیم‌گیری بستگی داشته و تحلیل آنها به دقت بیشتری نیاز دارد. با توجه به نوع معیارهای مکانیابی فرودگاه، در اینجا از مدل‌های غیرجبرانی

در طرح‌های تفصیلی فرودگاه‌ها، انتخاب مکان مناسب برای آنها یکی از بخش‌های مهم است. برای انتخاب محل فرودگاه، اولین گام تعیین شاخص‌های اصلی است، تا بر اساس آنها انتخاب محل مناسب با ابعاد و مشخصات مورد نظر، امکان پذیر شود. فرایند مکانیابی فرودگاه باید به صورت مجموعه‌ای منسجم و هماهنگ باشد و تمام عوامل مؤثر در تعیین محل مناسب در نظر گرفته شوند [۴۳].

عوامل مؤثر در انتخاب محل استقرار فرودگاه‌ها را می‌توان به چهار گروه زیر تقسیم کرد:

- ۱- عوامل فیزیکی، شامل:
 - چگونگی توسعه فضای زمینی،
 - دسترسی به سیستم حمل و نقل زمینی،
 - وجود زمین کافی برای توسعه آبی فرودگاه،
 - نزدیکی به مراکز عمده تقاضای حمل و نقل هوایی،
 - دسترسی به خدمات تأسیساتی لازم در فرودگاه.

۲- عوامل هوانوردی شامل:

- شرایط جوی و آب و هوایی،
- موقعیت فرودگاه‌های اطراف و کریدورهای ارتباطی هوایی،
- موقعیت موانع موجود در اطراف فرودگاه و دسترسی به فضای هوایی و زمینی کافی.

۳- عوامل اقتصادی شامل:

- تحلیل اقتصادی ساخت،
- ارزیابی و تحلیل سود - هزینه،

حال در نظر بگیرید، سه گزینه داشته باشیم، یعنی $m = 3$ و آنها را با A_3, A_2, A_1 نمایش دهیم. در این صورت ($3! = 6$) جایگشت مختلف خواهیم داشت، که عبارتند از:

$$\begin{aligned} P_1 &= \{A_1, A_2, A_3\}, \\ P_2 &= \{A_1, A_3, A_2\}, \\ P_3 &= \{A_2, A_1, A_3\}, \\ P_4 &= \{A_2, A_3, A_1\}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} P_5 &= \{A_3, A_1, A_2\}, \\ P_6 &= \{A_3, A_2, A_1\}, \end{aligned}$$

که در آنها:

$$\begin{aligned} P_i &= \text{جایگشت } i\text{ام}, \\ A_i &= \text{مأم، است.} \end{aligned}$$

به منظور انتخاب جایگشت برتر، برای هر جایگشت یک مجموعه موافق و یک مجموعه مخالف تعریف می‌شود. این مجموعه‌ها گزینه‌های یک جایگشت را دو به دو مقایسه می‌کنند [۸]، مثلاً برای جایگشت $P_5 = \{A_3, A_1, A_2\}$ ، مجموعه موافق و مخالف عبارت است از:

$$\text{مجموعه موافق} = \{A_3 \geq A_1, A_3 \geq A_2, A_1 \geq A_2\} \quad (4)$$

$$\text{مجموعه مخالف} = \{A_3 \leq A_1, A_3 \leq A_2, A_1 \leq A_2\} \quad (5)$$

وزن حالت موافق (یعنی برتر بودن گزینه A_i بر A_j یا $A_i \geq A_j$) و وزن حالت مخالف (یعنی برتر بودن گزینه A_j بر A_i یا $A_j \geq A_i$) محاسبه و از هم کم می‌شوند، حاصل این تفاضل وزن نهایی جایگشت را نشان می‌دهد. برای مثال، جایگشت i ام بصورت زیر است:

$$P_i = (\dots, A_k, \dots, A_l, \dots) \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

در این جایگشت طبق تعریف، گزینه A_k رتبه بیشتری از A_l دارد. برای محاسبه وزن هر جایگشت، وزن تمام تقدم‌های دو به دو را محاسبه و با هم جمع می‌کنیم. وزن برتری گزینه k ام بر l ام (یعنی $A_k \geq A_l$) عبارت است از:

استفاده می‌شود. در این پژوهش با توجه به عملکرد رفتار مدلها، از مدل جایگشت (پرماتاسیون)^۱ استفاده شده است [۵و۸].

۳. مکانیابی با استفاده از روش جایگشت (پرماتاسیون)

در این روش تمام جایگشت‌های ممکن، مرتب شده و مقدار وزن یا ارجحیت هر کدام از آنها محاسبه می‌شود. جایگشتی که بیشترین وزن را دارد به عنوان بهترین حالت در نظر گرفته می‌شود. اگر m گزینه داشته باشیم، $m!$ جایگشت خواهیم داشت که از بین آنها بهترین جایگشت را انتخاب می‌کنیم [۸].

فرض کنید m گزینه داریم (A_1, A_2, \dots, A_m) که می‌خواهیم با توجه به n معیار (x_1, x_2, \dots, x_n) آنها را مورد ارزیابی قرار دهیم، ماتریس تصمیم‌گیری D را به شکل زیر تشکیل می‌دهیم [۹].

$$D = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

که در آن:

$$D = \text{ماتریس تصمیم‌گیری}$$

$$m = \text{تعداد گزینه‌ها}$$

$$n = \text{تعداد معیارها}$$

$$r_{ij} = \text{عملکرد گزینه } A_i \text{ به ازای معیار } x_j$$

با توجه به این که اهمیت (وزن) معیارهای (x_1, x_2, \dots, x_n) با هم متفاوت است، لذا ضریب ارجحیت نرمال شده آنها را با w_i تا w_n نشان می‌دهیم، بنابراین:

$$(2)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1$$

که در آن:

$$w_j = \text{وزن معیار } x_j \text{ است.}$$

یکدیگر متفاوت باشند (هزینه به ریال در مقابل وزن به کیلوگرم) و به این دلیل انجام عملیات ریاضی قبل از بی‌مقیاس کردن یا یکسان‌سازی مقیاسها مجاز نیست. همچنین در اندازه‌گیری یک مقیاس کیفی ممکن است از مقیاس‌های فاصله‌ای و رتبه‌ای استفاده شود. یک روش عمومی در اندازه‌گیری یک شاخص کیفی با مقیاس فاصله‌ای، استفاده از مقیاس دو قطبی فاصله‌ای، بر اساس یک مقیاس ده نقطه‌ای است، به طوری که صفر مشخص‌کننده کمینه ارزش ممکن (که عملاً قابل درک باشد) و ده مشخص‌کننده بیشینه ارزش ممکن از شاخص مورد نظر است. همچنین نقطه وسط نیز نقطه شکست مقیاس بین مساعدها و نامساعدهاست.

جدول ۱. تبدیل ارزش شاخصهای

کیفی به شاخصهای کمی

ارزش کیفی	ارزش کمی
	۰
خیلی کم	۱
کم	۳
متوسط	۵
زیاد	۷
خیلی زیاد	۹
	۱۰

در این روش، برای ارزش گذاری شاخص‌های با جنبه مثبت (مانند راحتی)، مطلوبیت آن ارزش کمی بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد، به طور مشابه برای شاخص‌های با جنبه منفی (مانند سختی کار) هر چه کمتر باشد، دارای مطلوبیت بیشتر و در نتیجه ارزش کمی بیشتری است.

قابل توجه است که ارزشهای صفر و ده عملاً در مقیاسهای فوق کمتر مورد استفاده واقع می‌شوند، ضمناً ارزشهای ۲، ۴، ۶ و ۸ را می‌توان به عنوان ارزشهای واسطه در مقیاس فوق به کار برد. عملیات جمع و ضرب با مقیاس فوق با توجه به استنباط‌های زیر مجاز است:

الف- در این‌گونه مقیاس فرض بر این است که به طور مثال امتیاز ۹، سه برابر مناسب‌تر از امتیاز ۳ است.

ب- به علاوه به طور مثال اختلاف بین زیاد و کم با اختلاف بین متوسط و خیلی کم (هر دو با امتیاز ۴) یکسان است.

$$T_i = \sum_{j \in S_{kl}} w_j - \sum_{j \in R_{kl}} w_j \quad (7)$$

که در آن:

$$T_i = \text{وزن جایگشت } A_i$$

$$S_{kl} = \{j | r_{kj} \geq r_{lj}\}, \quad k, l = 1, 2, 3, \dots, m, \quad k \neq l, \quad (8)$$

$$R_{kl} = \{j | r_{lj} \geq r_{kj}\}, \quad k, l = 1, 2, 3, \dots, m, \quad k \neq l, \quad (9)$$

به عبارت دیگر وزن برتری A_k بر A_l را به این ترتیب به دست می‌آوریم که عملکرد این دو را روی همه معیارها با هم مقایسه می‌کنیم، در هر معیاری که عملکرد گزینه k بر گزینه l ترجیح داشته (یا مساوی آن باشد یعنی $r_{kj} \geq r_{lj}$)، وزن آن معیار را در مجموعه موافق در نظر می‌گیریم تا مقدار $(\sum_{j \in S_{kl}} w_j)$ محاسبه شود و در هر معیاری که k بر l ترجیح ندارد (کمتر یا مساوی است یعنی $r_{kj} \leq r_{lj}$) وزن آن معیار را جزء مجموعه مخالف در نظر می‌گیریم تا مقدار $(-\sum_{j \in R_{kl}} w_j)$ محاسبه شود. جمع جبری این دو مقدار برتری A_k بر A_l را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر وزن برتری A_k بر A_l (برای معیار j) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(10)$$

$$\text{وزن برتری } A_k \text{ بر } A_l \text{ به ازای معیار } j = \begin{cases} w_j, & r_{kj} \geq r_{lj} \\ -w_j, & r_{kj} \leq r_{lj} \end{cases}$$

بنابراین وزن برتری A_k بر A_l روی کلیه معیارها از رابطه (۷) به دست می‌آید.

بعد از این که وزن همه جایگشت‌ها (T_i) به ازای $(i = 1, \dots, m!)$ محاسبه شد، جایگشتی که بیشترین وزن ($\max T_i$) را دارد به عنوان بهترین جایگشت انتخاب می‌شود.

۴. مقیاس اندازه‌گیری شاخص‌ها

یک گزینه (A_i) ممکن است توسط دو نوع شاخص (X_j) توصیف شود: شاخص کمی (هزینه) و شاخص کیفی (راحتی) [۱۰]. مقیاس‌های اندازه‌گیری شاخص‌های کمی می‌تواند با

$$d_j = 1 - E_j, \forall_j \quad (14)$$

که در آن:

$$d_j = \text{درجه انحراف گزینه‌ها به ازای معیار } j \text{ ام}$$

و سرانجام برای اوزان (w_j) از شاخص‌های موجود خواهیم داشت:

$$(15) w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}$$

که در آن:

$$w_j = \text{وزن معیار } j \text{ ام}$$

اگر تصمیم گیرنده با یک قضاوت مهندسی، ضریب (λ_j) را نیز به عنوان اهمیت نسبی برای شاخص j ام در نظر داشته باشد، آنگاه می‌توان w_j محاسبه شده از طریق آنتروپی را به صورت زیر تعدیل کرد [9]:

$$(16) w'_j = \frac{\lambda_j \cdot w_j}{\sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot w_j} \quad \forall_j$$

که در آن:

$$w'_j = \text{وزن تعدیل شده معیار } j \text{ ام است}$$

5. استفاده از مدل برای مکانیابی فرودگاه انتخابی

در این بخش نحوه عملکرد مدل جایگشت برای مکانیابی یک فرودگاه خاص بررسی و بهترین محل فرودگاه براساس این مدل تعیین می‌شود. اطلاعات تهیه شده قبل از ورود به مدل می‌باید دسته بندی و از نظر محدوده تعریف شوند.

مراحل مختلف مدل مطروحه در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.

ج- ترکیب ارزشها برای شاخص‌های مختلف مجاز است، زیرا اختلاف بین هر دو ارزش مخصوص (مثلاً زیاد و کم) برای هر شاخص مفروض یکسان است.

قابل توجه است که در نظر گرفتن واژه‌های فوق برای مقیاس مفروض کاملاً اختیاری است و می‌توان از واژه‌های دیگری (مانند بد، ضعیف، عالی و غیره) استفاده کرد.

در این مدل برای بی‌مقیاس کردن عملکردهای ماتریس تصمیم‌گیری از روش بی‌مقیاس کردن خطی استفاده شده است [۱۱، ۱۰، ۱۲].

۴-۱ محاسبه توزیع احتمال با روش آنتروپی

آنتروپی در تئوری اطلاعات معیاری برای تعیین مقدار عدم اطمینان آمار توسط یک توزیع احتمال گسسته است، به طوری که این عدم اطمینان، در صورت پخش بودن توزیع، بیشتر از زمانی است که توزیع فراوانی فشرده‌تر است [۸].

همان طور که گفته شد، یک ماتریس تصمیم‌گیری را به صورت ماتریس D در نظر می‌گیریم. محتوای اطلاعات موجود در این ماتریس را ابتدا به صورت زیر نرمالیزه و بی‌بعد می‌کنیم.

$$(11) p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}; \forall i, j$$

شاخص همگرایی E_j ، برای هر معیار را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$(12) E_j = -k \sum_{i=1}^m [p_{ij} \cdot \ln p_{ij}]; \forall j$$

$$(13) K = \frac{1}{\ln m},$$

که در آن:

$$E_j = \text{شاخص همگرایی گزینه‌ها به ازای معیار } j \text{ ام}$$

$$K = \text{یک عدد مثبت، به منظور تامین } 0 \leq E \leq 1 \text{، است}$$

عدم اطمینان یا درجه انحراف (d_j) از اطلاعات ایجاد شده به ازای شاخص j ام برابر است با:

در این مرحله با توجه به بررسی‌های انجام شده و نقاط مشترک، شاخص‌های زیر به عنوان شاخص‌های مشترک برگزیده شدند:

فاصله تا مراکز تولید سفر، نوع خاک محل، نوع کاربری فعلی زمین، مساحت منطقه (برای توسعه آتی)، دسترسی به مراکز جمعیتی (سیستم حمل و نقل زمینی)، موانع طبیعی، موانع غیرطبیعی (دکل برق فشار قوی و ...)، آلودگی صوتی، مسائل زیست محیطی و مسائل اقتصادی.

مرحله سوم - تفکیک نوع شاخص‌ها از نظر کمی و کیفی: از بین شاخص‌ها، شاخص فاصله تا مراکز تولید سفر، کمی و سایر شاخص‌ها کیفی هستند. شاخص فوق دارای تاثیر معکوس است (هر چه فاصله کمتر باشد، مطلوب‌تر است).

شاخص‌های کیفی ابتدا با توجه به نوع تاثیر آنها مشخص و به شاخص‌های کیفی قابل مقایسه تبدیل می‌شوند.

در مرحله بعد شاخص‌هایی که در محدوده قرار نمی‌گیرند حذف می‌شوند. در این مرحله تمام شاخص‌ها برای استفاده در مدل باقی می‌مانند.

۱-۲-۵ بی بعد کردن شاخص‌ها

در این مرحله شاخص‌ها براساس نوع تاثیر آنها (مستقیم یا معکوس) بی‌مقیاس می‌شوند که در نهایت مقدار شاخص‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

۲-۲-۵ محاسبه وزن شاخص‌ها

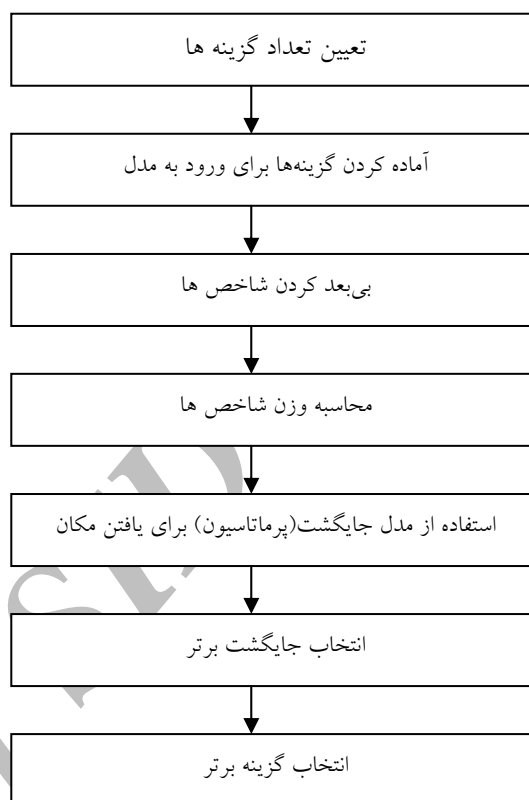
در این مرحله وزن هر دسته از شاخص‌ها به منظور مشخص کردن تاثیر شاخص بر گزینه‌ها مشخص می‌شود تا بتوان با محاسبه کلیه وزن‌ها و تاثیر آنها بر شاخص‌ها در نهایت موقعیت هر گزینه را محاسبه کرد. با توجه به تاثیر گذاری شاخص بر گزینه‌ها به هر یک از شاخص‌ها یک ضریب اختصاص داده می‌شود.

در این مرحله با استفاده از روش آنتروپی این ضرائب تعیین و در ادامه مقدار k محاسبه می‌شود.

$$m = 4,$$

براساس رابطه (۱۳)؛

$$k = \frac{1}{\ln m} = \frac{1}{\ln 4} = 0.721 \quad (17)$$



شکل ۱. مراحل اجرایی مدل مکانیابی فرودگاه

۱-۵ تعیین تعداد گزینه‌ها

پس از بررسی نقشه‌ها و مطالعات فاز اول، مکان‌هایی که شرایط اولیه برای احداث فرودگاه را دارند تعیین می‌شوند. که در این مطالعه موردی چهار مکان برای احداث فرودگاه پیشنهاد شده است.

۲-۵ آماده کردن گزینه‌ها برای ورود به مدل

در این بخش شاخص‌های هر گزینه دسته بندی، از نظر کمی و کیفی تفکیک شده و به بخش بعد فرستاده می‌شوند که این فرایند شامل چند مرحله است:

مرحله اول - مشخص کردن شاخص‌های هر گزینه:

با توجه به مطالعات انجام شده شاخص‌های موثر در انتخاب گزینه برتر مشخص می‌شوند.

مرحله دوم - مشخص کردن شاخص‌های مشترک قابل مقایسه گزینه‌ها:

جدول ۲. ارزش کمی شاخص‌های کیفی و نوع تاثیر آنها بر ارزش شاخص‌ها

شاخص	تاثیر	گزینه ۱	گزینه ۲	گزینه ۳	گزینه ۴
نوع خاک محل	مستقیم	۹	۵	۳	۵
نوع کاربری فعلی زمین	مستقیم	۹	۹	۷	۷
مساحت منطقه	مستقیم	۹	۹	۷	۵
دسترسی به مراکز جمعیتی	مستقیم	۹	۷	۵	۹
موانع طبیعی	معکوس	۷	۳	۷	۱
موانع غیر طبیعی	معکوس	۳	۳	۱	۳
آلودگی صوتی	معکوس	۹	۷	۳	۱
آلودگی زیست محیطی	معکوس	۷	۷	۳	۳
ارزش اقتصادی	مستقیم	۷	۵	۵	۳

جدول ۳. مقادیر بی‌بعد شده عملکرد گزینه‌ها به ازای هر یک از شاخص‌ها

حرف نظیر	شاخص	ارزش شاخص			
		گزینه یک	گزینه دو	گزینه سه	گزینه چهار
A	فاصله از مرکز تولید سفر	۰/۷۵	۰/۴۱	۰/۵۶	۱
B	نوع خاک محل	۱	۰/۵۶	۰/۳۳	۰/۵۶
C	نوع کاربری فعلی زمین	۱	۱	۰/۷۸	۰/۵۶
D	مساحت منطقه	۱	۱	۰/۷۸	۰/۵۶
E	دسترسی به مراکز جمعیتی	۱	۰/۷۸	۰/۵۶	۱
F	موانع طبیعی	۱	۰/۴۳	۱	۰/۱۴
G	موانع غیر طبیعی	۱	۱	۰/۳۳	۱
H	آلودگی صوتی	۱	۰/۷۸	۰/۳۳	۰/۱۱
I	آلودگی زیست محیطی	۱	۱	۰/۴۳	۰/۴۳
K	ارزش اقتصادی	۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۴۳

شاخص λ_m به ازای گزینه j است. جدول ۴ مقادیر p_{ij} هر یک از شاخص‌ها را برای چهارگزینه مورد نظر نشان می‌دهد.

در ادامه، مقادیر P_{ij} (توزیع احتمال گسسته) با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شوند. همان طور که ذکر شد P_{ij} توزیع احتمال

جدول ۴. مقدار p_i هر یک از شاخص های گزینه ها

p	فاصله از مرکز تولید سفر	نوع خاک محل	نوع کاربری فعلی زمین	مساحت منطقه	دسترسی به مراکز جمعیتی	موانع طبیعی	موانع غیر طبیعی	آلودگی صوتی	مسائل زیست محیطی	مسائل اقتصادی
گزینه یک	۰/۲۸	۰/۴۱	۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۹	۰/۳۰	۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۳۵
گزینه دو	۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۳۰	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۲۵
گزینه سه	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۳۹	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۵
گزینه چهار	۰/۳۷	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۳۰	۰/۰۶	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۱۵

جدول ۵. مقدار $Ln p_{ij}$ به ازای هر کدام از گزینه ها

$Ln p$	فاصله از مرکز تولید سفر	نوع خاک محل	نوع کاربری فعلی زمین	مساحت منطقه	دسترسی به مراکز جمعیتی	موانع طبیعی	موانع غیر طبیعی	آلودگی صوتی	مسائل زیست محیطی	مسائل اقتصادی
گزینه یک	-۱/۲۹	-۰/۸۹	-۱/۲۷	-۱/۲۰	-۱/۲۰	-۰/۹۴	-۱/۲۰	-۰/۸۰	-۱/۰۵	-۱/۰۵
گزینه دو	-۱/۹۰	-۱/۴۸	-۱/۲۷	-۱/۲۰	-۱/۴۶	-۱/۷۹	-۱/۲۰	-۱/۰۵	-۱/۰۵	-۱/۳۹
گزینه سه	-۱/۵۸	-۱/۹۹	-۱/۵۲	-۱/۴۶	-۱/۷۹	-۰/۹۴	-۲/۳۰	-۱/۹۰	-۱/۹۰	-۱/۳۹
گزینه چهار	-۱/۰۰	-۱/۴۸	-۱/۵۲	-۱/۷۹	-۱/۲۰	-۲/۸۹	-۱/۲۰	-۳/۰۰	-۱/۹۰	-۱/۹۰

جدول ۶. مقادیر E_j و w_j هر کدام از گزینه ها

	فاصله از مرکز تولید سفر	نوع خاک محل	نوع کاربری فعلی زمین	مساحت منطقه	دسترسی به مراکز جمعیتی	موانع طبیعی	موانع غیر طبیعی	آلودگی صوتی	مسائل زیست محیطی	مسائل اقتصادی
E_j	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۸۴	۰/۹۴	۰/۹۷
d_j	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۰۶	۰/۰۳
w_j	۰/۰۶۵۶	۰/۰۹۴۳	۰/۰۰۹۸	۰/۰۳۲۱	۰/۰۳۲۱	۰/۲۴۰۴	۰/۰۹۰۵	۰/۲۸۱۲	۰/۱۰۲۷	۰/۰۵۱۴

$$m! = 4! = 24 \quad (18)$$

یعنی تعداد جایگشت های مختلف اولویت گزینه ها ۲۴ حالت است. در مرحله بعد تک تک حالات بایستی بررسی شوند و برای هر حالت مقادیر R_{KL} و S_{KL} محاسبه می شوند:

$$S_{kl} = \text{مجموعه فرعی موافق،}$$

$$R_{KL} = \text{مجموعه فرعی مخالف،}$$

مقادیر فوق برای یکی از جایگشت ها به شرح زیر هستند:

با استفاده از مقادیر جداول فوق و رابطه (۱۲)، مقدار E_j محاسبه می شود (جدول ۶). با استفاده از روابط ۱۴ و ۱۵ مقدار d_j و w_j برای هر کدام از گزینه ها محاسبه می شود.

۳-۵ استفاده از مدل پرماتاسیون برای یافتن مکان بهینه

پس از طی مراحل فوق با توجه به شاخص های مشترک موجود و اوزان هر شاخص، گزینه ها به مدل پرماتاسیون وارد شده و براساس این مدل، رتبه هر گزینه مشخص می شود. در مرحله اول مقدار $m!$ محاسبه می شود. (m تعداد گزینه هاست)

۵-۵ انتخاب گزینه برتر

باتوجه به جایگشت انتخاب شده، گزینه ۱ اولویت دارد و بنا بر این، این گزینه به عنوان گزینه برتر انتخاب می شود.

۶. نتیجه گیری

برای انتخاب محل فرودگاه اولین گام تعیین شاخص های اصلی است تا بر اساس آن محل مناسبی با ابعاد و مشخصات مورد نظر انتخاب شود، زیرا غالباً این معیارها در واقع برای توسعه فرودگاه های موجود نیز قابل استفاده و کاربرد هستند.

برای انتخاب مکان فرودگاه، ابتدا بایستی براساس معیارهای هوانوردی، فیزیکی، اقتصادی و زیست محیطی، تعدادی گزینه که شرایط اولیه را دارند، مورد مطالعه قرار گیرند، سپس شاخص های مؤثر در مقایسه گزینه ها مطرح می شوند، در این حالت با استفاده از فرآیند زیر گزینه برتر انتخاب می شود:

۱- تعیین گزینه هایی که شرایط اولیه برای احداث فرودگاه را دارا باشند.

۲- آماده کردن گزینه ها برای ورود به مدل

۱-۲- استفاده از روش خطی برای بی بعد کردن شاخص ها

۲-۲- استفاده از روش آنتروپی به منظور وزن دهی

به شاخص ها

۳- استفاده از مدل پرماتاسیون (جایگشت) برای به دست آوردن مکان بهینه

۴- انتخاب جایگشت برتر

۵- انتخاب گزینه برتر

با توجه به ارزیابی عملکرد این مدل در مکانیابی فرودگاهها، این مدل توانایی برنامه ریزی و مکانیابی در پروژه های آبی را دارد. از مزایای این مدل می توان به راحتی، سرعت عمل و هزینه کم آن اشاره کرد. از سایر مزایای این مدل می توان موارد زیر را برشمرد:

- کم شدن نقش خطای انسانی در طول انجام عملیات؛

- محدود نبودن مدل در مورد تعداد گزینه و تعداد شاخص؛

- قابلیت تعمیم مدل به سایر مکانها؛

- پاسخگویی به کلیه محدودیت ها، الزامات و پیش فرضهای لازم در خصوص مکانیابی فرودگاه.

مدل ارائه شده در این مقاله در واقع آغازگر فرایندی درگستره وسیع طراحی مدل های مناسب برای انتخاب گزینه برتر، از بین گزینه های مختلف برای محل فرودگاه است.

جدول ۷. مقادیر R_{KL} و S_{KL} محاسبه شده

گزینه	۱	۲	۳	۴
۱	۰	۱	۱	۰/۹۳۴۴۰۷
۲	۰/۲۳۵۱۱۵	۰	۰/۶۹۴۰۲۶	۰/۹۰۲۲۹۵
۳	۰/۲۴۰۳۸۱	۰/۳۵۷۳۴۶	۰	۰/۷۱۷۵۵۵
۴	۰/۱۸۸۱۸۴	۰/۲۸۲۴۴۵	۰/۳۹۴۹۷	۰

این اعداد نشان دهنده مقادیر R_{KL} و S_{KL} بین گزینه ها هستند به این صورت که:

$$S_{12} = 1$$

$$S_{23} = 0.694$$

$$R_{31} = 0.24$$

$$R_{42} = 0.2824$$

۵-۴ انتخاب جایگشت برتر

در این مرحله با توجه به محاسبات و عملیات انجام شده، ارزش هر جایگشت T_i محاسبه و سپس جایگشت برتر (مناسب) انتخاب می شود. با توجه به جایگشت برتر می توان اولویت گزینه ها را مشخص کرد. برای هر جایگشت مقدار ارزش آن در جدول ۸ نشان داده شده است. ترتیب شماره ها نشان دهنده اولویت گزینه ها است.

همان گونه که در جدول ۸ دیده می شود، مقدار بیشینه T_i برابر است با:

$$\max T_i = 3.55 \quad (19)$$

که این مقدار مربوط به جایگشت ۱۲۳۴ است.

جدول ۸. مقادیر ارزش هر جایگشت

حالت جایگشت	ارزش جایگشت	حالت جایگشت	ارزش جایگشت
۳۱۴۲	۰/۱۱	۱۲۳۴	۳/۵۵
۳۱۲۴	۱/۳۶	۱۲۴۳	۲/۹۰
۳۲۱۴	۱/۳۶	۱۳۲۴	۲/۸۸
۳۲۴۱	-۱/۶۶	۱۳۴۲	۱/۶۴
۳۴۱۲	-۱/۳۷	۱۴۳۲	۰/۹۹
۳۴۲۱	-۲/۹۰	۱۴۲۳	۱/۶۶
۴۱۲۳	-۰/۱۷	۲۱۳۴	۲/۰۲
۴۱۳۲	-۰/۵	۲۱۴۳	۱/۳۷
۴۲۱۳	-۱/۳۶	۲۳۴۱	-۰/۹۹
۴۲۳۱	-۲/۸۸	۲۳۱۴	۰/۵
۴۳۱۲	-۲/۰۲	۲۴۳۱	-۱/۶۴
۴۳۲۱	-۳/۵۵	۲۴۱۳	-۰/۱۲

۷. مراجع

۱. صفارزاده، محمود (۱۳۷۹) "برنامه‌ریزی و طراحی فرودگاه"، شرکت فرودگاه‌های کشور، تهران.
۲. صفارزاده، محمود "راهنمای تهیه طرح جامع فرودگاه‌ها"، مرکز تحقیقات و آموزش وزارت راه و ترابری، ۱۳۷۶.
3. Federal Aviation Administration (1993) "Airport Design", Advisory Circular AC 150/5300-13, Federal Aviation Administration, Washington, DC.
4. Federal Aviation Administration (1995) "Airport master plans" Advisory Circular AC 150/5070-6A, Federal Aviation Administration, Washington, DC.
5. International Civil Aviation Organization (1997) "Airport planning manual, Part1: Master planning", 2nd Edition, International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada.
6. International Civil Aviation Organization (1995) "Airport planning manual, Part 2: Land use and environmental control" 2nd. edition, International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada.
7. Bodily, S. E (1995) "Modern decision making" McGraw Hill.
9. Hwang, C. L. and Yoon, K. (1991) "Multiple Attribute Decision Making"; Springer Verlag.
10. International Civil Aviation Organization (1990) "Aerodromes, Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation, vol. 1: Aerodrome design and operations, 1st ed.", International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada..
11. Ashford, Norman, and Wright, Paul H. (1994) "Airport engineering"; Third Edition, John Wiley & Sons.
12. Horonjeff, R. and Mc.Kelvey, F.X. (1994) "Planning and design of airports", Fourth Edition, McGraw Hill.
- اصغر پور، محمد جواد "تصمیم‌گیریهای چند معیاره"، دانشگاه تهران، ۱۳۸۱.

پانویس‌ها:

- 1- Multiple Criteria Decision Making
- 2- Multiple Objective Decision Making
- 3- Multiple Attribute Decision Making
- 4- Non – Compensatory Model
- 5- Compensatory Model
- 6- Permutation

بررسی تاثیر نوع سنگدانه بر خصوصیات اصطکاکی و نفوذپذیری اندودهای سنگدانه‌ای*

منصور فخری، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
ارشاد عموسلطانی، کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
E-mail: fakhri@kntu.ac.ir

چکیده

نگهداری و مدیریت راهها و جاده ها یکی از مهم‌ترین و بنیادی‌ترین اصول زیربنایی کشور هاست. نوع و کاربرد انواع اقدامات پیشگیرانه برای نگهداری روسازی‌های آسفالتی و بتنی طی سالهای متمادی تحت بررسی و تحقیق قرار گرفته است. کاهش هزینه ها و اقدامات کاهش دهنده زمان ترمیم راهها از جمله نکاتی است که با استفاده از اندودهای سنگدانه‌ای تحقق می‌یابد. تحقیقات نشان داده‌اند که صرف کردن نسبت ناچیزی از کل هزینه ها به اقدامات نگهداری باعث کاهش بسیار زیادی در هزینه‌های تعمیرات و ترمیم روسازی‌ها خواهد شد. یکی از اقدامات پیشگیرانه برای نگهداری روسازی های آسفالتی، استفاده از اندودهای سنگدانه ای است که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله ضمن معرفی و شناسایی اندودهای سنگدانه ای، نحوه طراحی، ساخت و اجرای انواع اندودهای سنگدانه ای ارایه می‌شود. هدف از این تحقیق معرفی انواع مختلف اندودهای سنگدانه ای و ارزیابی عملکرد آزمایشگاهی اندودهای مختلف است. در ساخت این نوع آسفالت سعی شده تا از امکانات موجود در کشور استفاده گردیده و تا حد امکان شرایط موجود در کشور شبیه سازی شود. در این تحقیق خصوصیات اصطکاکی و نفوذپذیری و همچنین میزان اندود کنندگی اندودهای سنگدانه‌ای و مقایسه انواع اندودهای سنگدانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: آسفالت‌های حفاظتی، اندودهای سنگدانه ای، مقاومت لغزشی، اندود سطحی، طرح اختلاط

۱. مقدمه

مقاومت لغزشی زیاد و... اشاره کرد. این نوع آسفالتها به چهار دسته کلی اندودهای آب‌بندی (بدون سنگدانه)، دوغاب آب‌بندی، آسفالت نازک سطحی و اندودهای سنگدانه‌ای تقسیم شوند.

انتخاب نوع آسفالت حفاظتی جهت اقدامات نگهداری به عوامل مختلفی بستگی داشته و دارای فرآیند پیچیده‌ای است. از جمله این عوامل می‌توان به شرایط آب و هوایی، مقدار ترافیک متوسط روزانه، میزان شاخص وضعیت روسازی، نوع روسازی، طرح هندسی راه و نوع اقدامات نگهداری و... اشاره کرد.

امروزه در اکثر نقاط دنیا سیستم‌های نگهداری و بویژه سیستم نگهداری پیشگیرانه از مهم‌ترین اقدامات برای حفظ روسازی‌های بتن آسفالتی به شمار می‌روند. عملیات نگهداری، به ویژه اقداماتی که باعث افزایش ایمنی جاده ها و راحتی رانندگی شوند، از اهمیت بیشتری برخوردارند.

از مهم‌ترین اقدامات پیشگیرانه برای نگهداری روسازی های بتن آسفالتی می‌توان به انواع آسفالت‌های حفاظتی اشاره کرد. این نوع آسفالتها که هم اکنون در اکثر کشورهای دنیا به گونه‌ای گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، مزایای فراوانی دربردارند که از جمله آنها می‌توان به هزینه اندک ساخت، عمر طولانی، دوام و

پس از ساخت و انجام آزمایش مارشال بر روی نمونه های ۴ اینچی از مخلوط توپکا و به دست آوردن درصد قیر بهینه، دو نمونه ویل تراک، یکی با درصد قیر بهینه و دیگری با درصد قیری بیش از درصد قیر بهینه (حدود ۰/۵ درصد برای شبیه سازی سطوح قیر زده) ساخته شدند. برای ساخت نمونه‌ها پس از اختلاط در آزمایشگاه، مخلوط به درون قالب ویل تراک ریخته و تحت اثر دستگاه متراکم کننده غلطکی متراکم شد. تعداد دورهای رفت و برگشت برای تراکم نمونه ۸۰ و بازوی تراکم برابر ۸۰ سانتیمتر انتخاب شد. قالب ویل تراک دارای ابعاد ۳۰۰×۳۰۰×۵۰ میلیمتر است. در حدود ۱۰ کیلوگرم مخلوط آسفالت گرم برای ساخت نمونه تهیه و توسط دستگاه متراکم شد. نمونه‌ها پس از تراکم به مدت ۱ روز برای عمل‌آوری در دمای آزمایشگاه قرار داده شدند. برای ساخت نمونه های مخلوط سنگدانه‌ای درشت دانه از آزمایش مارشال اصلاح شده و نمونه های ۶ اینچی استفاده شد. پس از تعیین میزان درصد بهینه قیر، چند نمونه با درصد بهینه قیر و چند نمونه با درصد قیر بیش از قیر بهینه ساخته شد. این نمونه‌های با درصد قیر زیاد برای ساخت نمونه های ساندویچی مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه های با درصد بهینه قیر برای ساخت نمونه های اندود سنگدانه‌ای تک لایه و دولایه به کار برده شدند.

پس از تراکم نمونه های بتن آسفالتی توسط دستگاه متراکم کننده غلتکی و عمل‌آوری نمونه‌ها، اجرای نمونه‌های اندود سنگدانه‌ای بر روی نمونه ها آغاز شد. پس از اجرای اندود سنگدانه‌ای بر روی نمونه‌های بتن آسفالتی، نمونه ها توسط همان متراکم کننده غلطکی تحت تراکم قرار گرفتند.

در ابتدا سعی شد تا از بار مشابهی برای تراکم نمونه ها استفاده شود، ولی از آنجا که اندود سنگدانه‌ای بایستی به وسیله غلتک‌های چرخ لاستیکی متراکم شود، سنگدانه‌ها کمی خرد شدند. شکل ۱ اثر میزان بار اضافی تراکم را که باعث خرد شدن سنگدانه‌ها شده است نشان می‌دهد.

در ساخت سایر نمونه‌ها سعی شد تا از میزان بار کاسته شده و تعداد دور رفت و برگشت دستگاه افزایش یابد. این حالت باعث شد که اثر تراکم در محل تا حدودی شبیه سازی شود. از آنجا که در محل نمونه‌ها توسط غلتک‌های چرخ لاستیکی متراکم شده و پس از یک روز تحت ترافیک سبک قرار می‌گیرند، بنابراین سنگدانه‌ها فرصت می‌یابند تا تحت بهترین و پایدارترین حالت قرار گیرند. برای مدل سازی چنین حالتی سعی شد تا تعداد دور رفت و برگشت دستگاه بیش از مقدار لازم باشد.

در این تحقیق از میان انواع مختلف آسفالت‌های حفاظتی، اندودهای سنگدانه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ساخت نمونه‌ها از قیر امولسیون CSS ساخت داخل استفاده شده است.

از بارزترین ویژگی‌های اندودهای سنگدانه‌ای می‌توان به مقاومت لغزشی زیاد این نوع آسفالت‌ها اشاره کرد و بنابراین شده است در ساخت این نوع آسفالت‌ها از سنگدانه های با مقاومت سایشی زیاد استفاده شود. به این منظور از دو نوع سنگدانه گرانی و یک نوع سنگدانه آهکی در ساخت نمونه ها استفاده شد. آزمایش‌های مربوط به سنگدانه ها و قیر امولسیونی، قبل از ساخت نمونه ها بر روی سنگدانه‌ها و قیر انجام شدند. پس از تایید آزمایش‌ها و شناسایی مصالح و با توجه به آن که شرایط ساخت با توجه به مصالح موجود در کشور می‌بایست تعیین شود، سعی شد تا با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده، در برخی موارد اصلاحاتی صورت گیرد.

در ساخت نمونه‌ها از آئین نامه های معتبر ساخت و اجرای اندودهای سنگدانه‌ای کشورهای انگلستان و استرالیا استفاده شده است. البته این آئین نامه ها با توجه به شرایط موجود در ایران نیاز به اصلاحاتی دارند که تعیین میزان این اصلاحات در محدوده این مطالعه نیست.

در این تحقیق ابتدا انواع مختلف نمونه‌های اندود سنگدانه‌ای در آزمایشگاه ساخته شدند و بر روی آنها آزمایش‌های مقاومت لغزشی و پخش ماسه صورت گرفتند. نمونه‌های اندود سنگدانه‌ای بر روی نمونه‌های توپکا و مخلوط سنگدانه‌ای درشت دانه به کار گرفته شدند. برای تراکم نمونه‌های اندود سنگدانه‌ای از دستگاه متراکم کننده ویل تراک استفاده شد.

۲. نحوه تراکم نمونه ها

انتخاب طرح اختلاط مناسب و ساخت و عمل‌آوری نمونه های اندود سنگدانه‌ای، با استفاده از آئین نامه انگلستان انجام شد به منظور ساخت نمونه‌ها به بستر متناسب با محل اجرا نیاز بود. بنابراین از دستگاه متراکم کننده غلطکی ویل تراک برای متراکم نمودن نمونه‌ها استفاده شد. دو نوع مخلوط آسفالتی گرم برای ساخت بستر جهت نمونه‌ها در نظر گرفته شدند. به منظور ارزیابی عملکرد اندود سنگدانه‌ای بر روی آسفالت‌های گرم، از توپکا با دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۱۰۱ (سازمان برنامه و بودجه) و مخلوط سنگدانه‌ای درشت دانه با دانه بندی شماره ۲ برای ساخت نمونه های آسفالت گرم استفاده شد.

بودن این ضرایب از آنها در ساخت نمونه ها استفاده شد. مهم ترین اثری که ضریب تورق زیاد در مخلوط های اندود سنگدانه ای می گذارد امکان قیر زدگی سطح اندود است. بنابراین برای این دو نوع سنگدانه از مقدار قیر کمتری در ساخت استفاده شد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی سنگدانه ها

نام آزمایش	سنگدانه	سنگدانه	آهکی
	گرانیتی A	گرانیتی B	
سولفات سدیم (درصد)	۰/۹۷	۱/۴۳	۰/۳۱
درشت دانه	۲/۶	-	۰/۶۱
سایش لوس آنجلس (درصد)	۲۶	۳۰	۱۸
ضریب تطویل	۲۳/۴	۴۲/۵	۱۲/۵
ضریب تورق	۱۸/۹	۲۴	۱۹/۲
شکستگی (درصد)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰



شکل ۱. اثر بار اضافی و خردشدگی سنگدانه ها، همچنین اثر میزان سنگدانه اضافی

۳. ساخت نمونه های اندود سنگدانه ای

برای ساخت نمونه های اندود سنگدانه ای از آئین نامه انگلستان استفاده شد. از آنجا که تعیین درصد قیر امولسیون کاربردی به عوامل مختلفی از جمله خصوصیات سطح روسازی، شکل و ابعاد سنگدانه ها، خصوصیات سنگدانه ها، میزان ترافیک و شرایط آب و هوایی منطقه بستگی دارد، بنابراین سعی شد تا حد امکان شرایط مشابه و ایده آل برای ساخت نمونه ها ایجاد شود.

پاشیدن قیر توسط استوانه ای مدرج با سوراخهایی در بالای آن صورت گرفت. به این ترتیب سعی شد تا به این وسیله پاشیدن قیر بر روی سطح روسازی توسط قیر پاش شبیه سازی شود. سرعت پخش قیر با توجه به مشخص بودن حجم قیر امولسیونی پاشیده شده بر روی سطح مشخص می شود.

برای شبیه سازی عمل ریزش سنگدانه ها بر روی سطح و به دلیل امکان کنترل کامل سرعت ریزش در آزمایشگاه، سعی شد تا سنگدانه ها به طور دستی و غیرتصادفی در سطح جاسازی شوند. سنگدانه ها قبل از ریختن، وزن شده و پس از تعیین وزن مورد نیاز سنگدانه ها، عمل ریزش انجام می شود.

در ساخت نمونه ها از سه نوع سنگدانه، گرانیتی نوع A، گرانیتی نوع B و آهکی استفاده شد. دو نوع سنگ گرانیتی مستقیماً از معدن برداشت شده و توسط سنگ شکن و در آزمایشگاه شکسته شدند. میزان تطویل و تورق این سنگدانه ها در مقایسه با سنگدانه آهکی در جدول ۱ آورده شده است. میزان ضریب تطویل و تورق این سنگدانه ها از سنگدانه آهکی بیشتر است، ولی به دلیل مهم بودن خصوصیات مربوط به سنگدانه های گرانیتی با وجود زیاد

عامل مهم دیگری که در تعیین میزان قیر موثر است میزان جذب قیر سنگدانه ها است. برای انجام این آزمایش دستگاه اسپکتروفوتومتر مورد نیاز است. از آنجا که این دستگاه در دسترس نبود برای در نظر گرفتن اثر جذب قیر سنگدانه ها و همچنین ایجاد چسبندگی بیشتر بین قیر و سنگدانه از روش پیش اندودی سنگدانه ها استفاده شد. پیش اندودی سنگدانه ها می تواند به وسیله افزودن مقداری آب یا گازوئیل، نفت سفید یا امولسیون قیری انجام شود.

با توجه به این که بکارگیری قیر امولسیون به عنوان ماده پیش اندودکننده آسان تر و مقرون به صرفه تر از سایر مواد است. بنابراین با توجه به مطالعات انجام شده مقدار ۱/۱۵٪ قیر امولسیونی به سنگدانه ها افزوده شد و اثر پیش اندودی سنگدانه ها نیز بر خواص اندودهای سنگدانه بررسی شد. شکل ۱ اثر پیش اندودی سنگدانه ها را بر میزان چسبندگی و بافت سطحی اندودها نشان می دهد. مطابق این شکل سنگدانه های پیش اندود نسبت به سنگدانه های ساده از بافت فشرده تری برخوردارند. برای تعیین اندازه سنگدانه ها با توجه به استاندارد انگلستان اندازه ۱۰ میلیمتر برای سنگدانه ها مورد استفاده قرار گرفت. این اندازه با فرض داشتن سطحی با سختی نرمال و وسایل نقلیه تجاری ۲۰۰-۱۰۰ وسیله در هر خط در روز به دست آمد. سنگدانه هایی که برای ساخت لایه دوم بکار برده شدند دارای ابعاد ۶ میلیمتر بودند.

سنگدانه‌ها بستگی دارد. سرعت پخش قیر از رابطه زیر به دست می‌آید [۱]:

$$R = 0.625 + (F \times 0.023) + [0.0375 + (F \times 0.0011)] \times ALD \quad (2)$$

که در آن:

F = فاکتور اصلاح وزنی،

ALD = میانگین حداقل ضخامت (mm) و

R = سرعت پخش قیر kg/m^2 است.

با در نظر گرفتن شرایط ترافیکی متوسط تا سنگین (۵۰۰-۱۵۰۰ وسیله در باند در روز) و سطح روسازی بسیار کم قیر و شرایط آب و هوایی متعادل و سنگدانه‌های پیش‌اندود یا متورق^۲، عامل اصلاح وزنی بر اساس استاندارد انگلستان برابر ۲ خواهد شد. [۱] برای به دست آوردن سرعت پخش صحیح قیر برای قیرهای امولسیون، میزان R به دست آمده در ضریب اصلاح زیر ضرب می‌شود.

$$CF = (90 / \text{درصد قیر، قیر امولسیونی}) \quad (3)$$

جدول ۲. تعیین سرعت پخش قیر و سنگدانه با توجه به میزان ALD

سرعت پخش سنگدانه (kg/m^2)	میزان قیر (l/m^2)	مقدار ALD (mm)	قطر متوسط (mm)	مقدار F_1^2	نوع سنگدانه
۵/۹۳	۱/۴۶	۴/۳۵	۶	۱۹/۲	آهکی
۱۰/۰۹	۱/۶۷	۷/۴	۱۰	۱۸/۹	گرانیتی نوع A
۶	۱/۴۶	۴/۴	۶	۲۴	گرانیتی نوع B
۱۰/۱۶	۱/۶۷	۷/۴۵	۱۰		
۵/۵۹	۱/۴۴	۴/۱	۶		
۹/۶۸	۱/۶۵	۷/۱	۱۰		

۵. آزمایش‌های انجام شده

۵-۱ آزمایش‌های مارشال جهت تعیین قیر بهینه لایه زیرین

برای مخلوط سنگدانه ای درشت دانه و توپکا

تعیین درصد قیر بهینه برای نمونه های مخلوط سنگدانه ای درشت دانه توسط آزمایش مارشال با نمونه های ۶ اینچی انجام شد. پس

عامل دیگری که در طراحی ها دارای اهمیت است میزان ALD^1 (میانگین حداقل ضخامت) مصالح است. نحوه به دست آوردن این پارامتر در مرجع ۱ آورده شده است.

۴. طراحی مخلوط اندود سنگدانه‌ای

هدف از طرح اندود سنگدانه‌ای، تعیین مقادیر دقیق قیر و سنگدانه‌هاست که برای اجرای کار محاسبه می‌شود. این روش بر اساس فرضیات زیر استوار است و برای تمام انواع سنگدانه های باز و با یک اندازه نیز صادق است.

الف: مقدار فضای خالی سنگدانه‌ها که توسط دستگاه مکانیکی پخش کننده مصالح روی قیر پخش می‌شود، قبل از غلتک‌زنی و با توجه به آرایش نا متعادل و نا پیوسته سنگدانه‌ها، تقریباً ۵۰ درصد حجم کل آن است.

ب: مقدار این فضای خالی بعد از غلطک‌زنی و جابه‌جا شدن سنگدانه‌ها به ۳۰٪ کاهش می‌یابد.

ج: پس از قرار گیری رویه اندود سنگدانه ای تحت ترافیک، سنگدانه‌ها بر روی مسطح ترین وجه خود قرار می‌گیرند. در چنین شرایطی مقدار فضای خالی به حدود ۲۰٪ می‌رسد و ضخامت نهایی رویه آسفالتی بامیانگین کوچک‌ترین بعد سنگدانه‌ها برابر می‌شود.

د: برای آنکه رویه آسفالتی عملکرد مناسبی داشته باشد ۶۰ تا ۸۰ درصد از فضای خالی باقی مانده (که ۲۰٪ فرض شده) بایستی با قیر پر شود. محاسبه این درصد، با توجه به حجم ترافیک عبوری از رویه آسفالتی تغییر می‌یابد.

۴-۱ تعیین سرعت پخش سنگدانه‌ها

سرعت پخش سنگدانه‌ها بر اساس رابطه ۱ به دست می‌آید: [۱]

$$(1) \quad (kg/m^2) = 1.364 \times ALD (mm)$$

سرعت پخش سنگدانه‌ها را بایستی در محل تعیین کرد. سرعت پخش سنگدانه‌های ۶ و ۱۰ میلیمتری با توجه به میزان ALD آنها در جدول ۲ آورده شده است. این نمونه‌ها بر روی سطحی معادل ۰/۱ مترمربع پخش شدند.

۴-۲ تعیین سرعت پخش قیر

سرعت پخش قیر به عواملی از جمله حجم ترافیک عبوری از راه، وضعیت روسازی لایه رویه، شرایط آب و هوایی منطقه و نوع

که در اشکال مشاهده می‌شود بافت ظاهری نمونه‌های با سنگدانه‌های گرانیتی بهتر از سنگدانه‌های آهکی است.

۳-۵ اندازه‌گیری مقاومت لغزشی نمونه‌های اندود سنگدانه‌ای

شناخت ضریب اصطکاک درمعادلات طرح هندسی راهها از اهمیت خاصی برخوردار است. تعیین شعاع پیچها به شیب‌های طولی و عرضی جاده با احتساب سرعت طراحی مناسب به آن بستگی دارد. اصطکاک سطحی عامل اصلی پیشگیری و تقلیل تصادفات ناشی از لغزندگی است. ضریب اصطکاک بین لاستیک و سطح جاده به عوامل زیر بستگی دارد [۴].

۱- مشخصات بافت سطح جاده و مصالح به کار رفته شامل بافت ریز، بافت درشت، بافت صیقلی (PSV)، سایش سنگ (AAV) و دانه‌بندی

۲- مشخصات لاستیک

۳- مشخصات وسیله نقلیه

۴- شرایط استفاده و عبور و مرور

۵- شرایط آب و هوایی



شکل ۲. میزان نفوذ سنگدانه‌های گرانیتی B



شکل ۳. مقطع اندود دولایه با محل شیار

افتادگی گرانیت A

از ساخت و تراکم نمونه‌ها و به دست آوردن مقاومت مارشال نمونه‌ها حجم و وزن مخصوص حقیقی و ظاهری نمونه‌ها به دست آمدند و سپس روابط حجمی مقادیر مارشال برای نمونه‌ها انجام شد. نتایج برای نمونه‌های مارشال ۶ اینچی، مخلوط سنگدانه‌ای درشت دانه و مارشال ۴ اینچی برای توپکا به شرح زیر است [۲]:

درصد قیر بهینه برای نمونه توپکا، ۵/۲ درصد و برای نمونه مخلوط سنگدانه‌ای، ۴/۱ درصد.

۲-۵ ساخت نمونه‌های اندود سنگدانه‌ای

نمونه‌ها در سه طرح تک لایه، دولایه و ساندویچی ساخته شدند. مقدار قیر لازم برای هرلایه در جدول (۲) قابل مشاهده است. سنگدانه‌ها به دو صورت ساده و پیش اندود برای ساخت به کار گرفته شدند. برای مقایسه حالت ساده نسبت به پیش اندود نیمی از سطح بتن آسفالتی با استفاده از سنگدانه‌های ساده و نیم دیگر با استفاده از سنگدانه‌های پیش اندود ساخته شدند.

برای متراکم نمودن نمونه‌ها، از متراکم کننده غلتکی با قابلیت تنظیم بار تراکم استفاده شد. این بار به صورت رفت و برگشتی به نمونه وارد می‌شود. در ابتدا مقدار بار ۷۰۰ کیلوگرم در تعداد دور ۸۰ بار مورد استفاده قرار گرفت، ولی مشاهده شد که سنگدانه‌ها در اثر اعمال فشار خرد شدند. لذا در ساخت نمونه‌های بعدی سعی شد تا از میزان بار ۵۰۰ کیلوگرم در تعداد دور ۱۰۰ استفاده شود.

عمل تراکم بایستی به گونه‌ای باشد تا سنگدانه‌ها تحت فشار اعمال شده خرد نشوند و به حد کافی در سطح نفوذ کرده و در حدامکان بتوانند در پایدارترین وضعیت خود قرار گیرند. این فرآیند باعث می‌شود تا پس از باز گشایی ترافیک بر روی مسیر، سنگدانه‌ها در مناسب‌ترین حالت قرار گرفته و درصد فضای خالی به حداقل برسد [۳]. به منظور شبیه‌سازی اثر ترافیک سعی شد تا بر میزان دوره‌های رفت و برگشت غلتک افزوده شود. با توجه به اشکال ۲ تا ۵، میزان نفوذ سنگدانه‌ها در سطوح زیرین مناسب و قرار گیری آنها نیز در حد مطلوب و رضایت بخش بود.

پس از اتمام غلتک‌زنی نمونه‌ها و عمل آوری آنها، دانه‌های اضافی و خرد شده از سطح نمونه‌ها جمع‌آوری شده و سطح برای انجام آزمایش‌های عملکردی آماده شد. با توجه به بافت سطحی نمونه‌ها مشاهده شد که سنگدانه‌های پیش اندود دارای بافت بهتر و میزان چسبندگی بیشتری نسبت به سنگدانه‌های ساده هستند. همان گونه

۵-۳-۲ اندازه گیری ضریب اصطکاک

دو روش برای مطالعه و اندازه گیری اصطکاک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

الف: روش مطالعه و تحقیق دربارهٔ بافت درشت

ب: روش اندازه گیری ضریب اصطکاک

در روش اول، تاثیر بافت درشت روسازی در رابطه بین سرعت و اصطکاک مورد مطالعه قرار گرفته و اندازه‌گیری اصطکاک به صورت غیر مستقیم و معمولاً با اندازه‌گیری عمق زبری^۵ رویه راه انجام می‌شود.

در روش دوم، اصطکاک سطح جاده مستقیماً به صورت اندازه گیری میزان اصطکاک بر اثر سایش لاستیک بر روی رویه راه تعیین می‌شود.

در این تحقیق عمق زبری اندودها توسط آزمایش پخش ماسه، و اصطکاک سطح اندود به وسیلهٔ دستگاه آونگ انگلیسی اندازه‌گیری شده است.

۵-۳-۳ روش آونگ انگلیسی

در هنگام آزمایش، بازوی آونگ از یک ارتفاع استاندارد H تحت تاثیر وزن خود W رها شده و در تماس با سطح جاده قرار می‌گیرد. در این تماس بر حسب آن که سطح جاده چقدر زبر بوده و اصطکاک ایجاد کند، بازوی آونگ به مقداری بالا رفته و در طرف دیگر عقربه روی مقیاس مدرج، درجه ای را نشان می‌دهد که به BPN معروف است و بیان کننده میزان مقاومت لغزشی سطح جاده یا ضریب اصطکاک است [۶].

اصلاح مربوط به اثر درجه حرارت سطح جاده توسط رابطه ۴ صورت می‌گیرد.

$$BPN_{20} = \frac{BPN}{1 - [0.00525(t - 25)]} \quad (۴)$$

که در آن:

BPN = مقدار متوسط عدد اصطکاک در دمای t، و

BPN₂₀ = عدد اصطکاک در دمای ۲۰ درجه است.

به منظور کم کردن خطای آزمایش، این آزمایش برای هر نمونه ۵ بار تکرار و عدد متوسط به عنوان BPN سطح یادداشت شد. نتایج مربوط به نمونه های مختلف و مقایسه آن با رویه های مختلف در جدول ۳ و شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۴. بافت اندود سنگدانه‌ای گرانیت A



شکل ۵. بافت و مقطع اندود سنگدانه‌ای آهکی

۵-۳-۱ مشخصات بافت سطح جاده

سه مشخصه مهم از سطح جاده که در اصطکاک بین لاستیک و رویه راه، در حالت مرطوب تاثیر دارند عبارتند از [۵]:

- بافت ریز مناسب در سطح جاده

- قابلیت زهکشی کافی جهت خارج کردن آب از سطح جاده

- بافت درشت و مناسب

بافت ریز روسازی نشان دهنده وضعیت سنگدانه‌های رویه راه و بیانگر زبری^۳ و صیقلی بودن^۴ ذرات سطح راه است. این بافت در

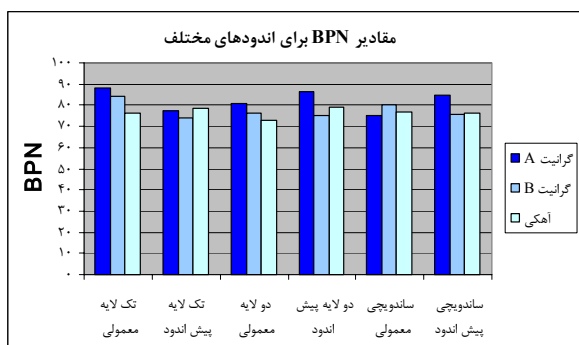
شرایط بارندگی و مرطوب، لایه نازک آب سطح جاده را جذب کرده و درگیری و تماس بین لاستیک و سطح جاده را افزایش داده

و در نتیجه ضریب اصطکاک آنها را زیاد می‌کند. بافت درشت به میزان بیرون زدگی سنگدانه‌ها از رویه راه اطلاق می‌شود و با

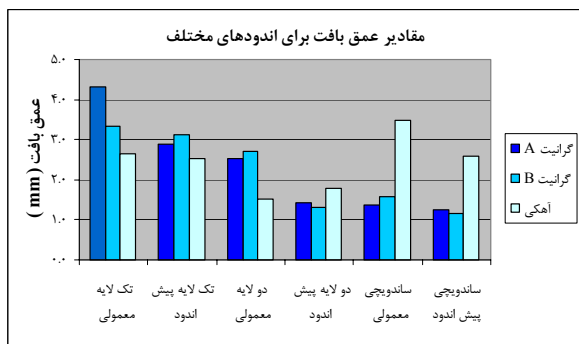
ایجاد کانال‌های باریک جریان، باعث می‌شود تا آب سطحی در هنگام بارندگی به سرعت از سطح جاده انتقال یابد که این عمل

باعث جلوگیری از پدیده Hydroplaning و در نتیجه افزایش اصطکاک روسازی می‌شود.

نتیجه زهکشی سطحی مناسب‌تر، میزان اصطکاک بیشتری نشان دادند.



شکل ۶. مقایسه مقادیر BPN برای اندودهای مختلف



شکل ۷. مقایسه مقادیر عمق بافت برای اندودهای مختلف

۴-۵ نفوذپذیری

نفوذپذیری مخلوط‌های بتن آسفالتی یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین معیارهای پذیرش انواع مخلوط‌های بتن آسفالتی است. اصولاً میزان نفوذپذیری یک مخلوط اثر مستقیمی بر دوام و عملکرد انواع مخلوط‌های بتن آسفالتی دارد. نفوذ آب به داخل بتن آسفالتی را می‌توان عامل اصلی خرابیها در روسازیهای آسفالتی عنوان کرد. از جمله این خرابیها می‌توان به قیرزدگی و انواع ترک خوردگی‌های سطح روسازی نظیر ترکهای پوست سوسماری اشاره کرد [۸].

پارامترهای زیادی بر میزان نفوذپذیری مخلوطها تاثیر گذارند. از جمله این پارامترها می‌توان به درصد فضای خالی موجود در مخلوط بتن آسفالتی اشاره کرد. درصد فضای خالی موجود و میزان پیوستگی این حفره‌ها با یکدیگر اثر بسزایی در نفوذ رطوبت به مخلوط بتن آسفالتی دارد. بر اساس تحقیقات انجام شده،

جدول ۳. مقادیر BPN به دست آمده از نمونه های اندودهای

سنگدانه ای در مقایسه با سایر رویه ها

نوع رویه	BPN	دما (°C)	اصلاح شده BPN
سطح توپکا معمولی	۵۳	۲۶	۵۵
سطح توپکا قیرزده	۴۲	۲۹	۴۴
آسفالت متخلخل	۶۴	۱۴	۶۲
اندود سنگدانه ای با گرانیت A	۸۰	۲۵	۸۲
اندود سنگدانه ای با گرانیت B	۷۵/۵	۲۵	۷۸
اندود سنگدانه ای با سنگدانه آهکی	۷۴/۵	۲۵	۷۷

۴-۳-۵ روش پخش ماسه

در این روش حجم معینی از ماسه با خصوصیات و دانه بندی خاص بر روی سطح جاده و به صورت دایره‌ای پخش می‌شود. این کار توسط صفحه فلزی و مدوری که به ارتفاع ۰/۲۵ اینچ از سطح رویه قرار می‌گیرد، انجام می‌شود. نسبت حجم ماسه اولیه به سطح پوشش شده با ماسه، عمق زبری رویه راه را به دست می‌دهد [۴].

۴-۳-۵-۱ روش انجام آزمایش پخش ماسه

استوانه فلزی به ابعاد ۲۰ میلی‌متر (قطر دایره) و ارتفاع ۸۰ میلی‌متر که حداقل حجم فضای خالی آن ۲۵۰۰۰ میلی‌متر مکعب باشد را از ماسه‌ای که حداقل ۹۰ درصد وزنی آن از الک نمره ۶۰ عبور کرده و روی الک نمره ۸۰ باقی بماند پر می‌کنیم. قبل از ریختن ماسه بر روی سطح نمونه، این سطح با یک برس نرم تمیز می‌شود. آنگاه ماسه با حجم معین را بر روی سطح نمونه می‌ریزیم و توسط یک دیسک محکم و تخت به قطر تقریبی ۶۰ تا ۷۵ میلی‌متر بر روی سطح پخش می‌کنیم. روی این دیسک باید با یک لاستیک سخت پوشانده شود. باید دقت شود که سطح ماسه پخش شده به صورت مدور درآید. پس از اتمام کار قطر دایره را در ۴ جهت خوانده و میانگین آن را ثبت می‌کنیم.

از تقسیم حجم ماسه به سطح پوشیده شده از ماسه، عمق بافت به دست می‌آید. میزان عمق بافت ۰/۸ برای یک رویه آسفالتی بسیار مناسب است. نتایج مربوط به عمق بافت برای نمونه های مختلف در شکل ۷ آورده شده است.

اشکال ۶ و ۷ نشان می‌دهند که نمونه‌های پیش‌اندود به علت وجود قیر در سطح سنگدانه‌ها، از مقاومت اصطکاکی کمتری برخوردارند. همچنین نمونه‌های تک لایه به علت داشتن عمق بافت بیشتر و در

جدول ۴. ضرائب نفوذپذیری اندازه‌گیری شده

برای نمونه‌ها

شماره نمونه	شکل مقطع	سطح موثر cm^2	مشخصات سطح موجود	فشار (بار)	زمان آزمایش (دقیقه)	ضریب نفوذپذیری (cm/s)
۱	چند ضلعی	۱۶۸/۹۷	اندود سنگدانه‌ای	۹	۱۲۰	7.47×10^{-8}
۲	دایره‌ای	۱۷۶/۶	اساس خاکی	۲	۴۵	2.97×10^{-6}
۳	چند ضلعی	۱۹۲/۶۶	توپکا (ترک خورده)	۱	۳	3.8×10^{-4}
۴	دایره‌ای	۱۷۶/۶	آسفالت درشت دانه	۱۷	۱۴۴۰۰	۰

۶. نتیجه گیری

از مطالعات و تحقیق آزمایشگاهی انجام گرفته بر روی نمونه های مختلف نتایج زیر حاصل شدند:

- سنگدانه های گرانیتی گیرش بیشتری نسبت به قیر امولسیونی CSS داشته و پوشش قیری مناسب تری ایجاد می کنند.
- سنگدانه های گرانیتی به علت داشتن چسبندگی بهتر (با این نوع قیر) و ضریب تورق بیشتر، عمق بافت کمتر و ظاهر یکنواخت تری نسبت به سنگدانه های آهکی ایجاد می کنند.
- اندودهای سنگدانه ای در مقایسه با سایر پوششهای آسفالت گرم از مقاومت لغزشی بیشتری برخوردارند.
- اندودسنگدانه‌ای به خوبی می‌تواند درزها و ترکهای موجود در سطح راه را آب‌بندی کند.
- در صورت اجرای مناسب انواع اندودهای سنگدانه‌ای، می‌توان از آنها به طور کوتاه مدت بر روی اساس خاکی راه‌های جدید استفاده کرد.
- نمونه چهارم از آزمایش نفوذپذیری، در مقایسه با نمونه شیارافزاده نشان داد که در صورتی که رویه‌های آسفالتی به درستی ساخته، اجرا و متراکم شوند، به خوبی می‌توانند از لایه‌های زیرین محافظت نمایند، ولی پس از گذشت مدتی از بهره‌برداری رویه‌ها، این رویه‌ها را می‌توان به وسیله اندودهای سنگدانه‌ای آب‌بندی کرد.
- ساخت اندودهای سنگدانه‌ای با شرایط مطرح شده در بالا برای کاربرد در ایران مناسب بوده و می‌توان از آنها برای روکش راه‌ها استفاده کرد.

افزایش درصد فضای خالی مخلوط‌های بتن آسفالتی باعث افزایش میزان نفوذپذیری مخلوط می‌شود [۹].

در این تحقیق از روش بار هیدروستاتیکی ثابت برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری مخلوط استفاده شد. مقدار بار اعمال شده بر سطح مخلوط با استناد بر منابع و تحقیقات انجام شده انتخاب شد. در پاره‌ای از موارد به دلیل مشاهده نکردن میزان نفوذپذیری لازم در زمان مورد نظر، سعی شد تا میزان بار افزایش یابد و در صورت مشاهده نکردن نتیجه لازم با افزوده شدن بار، آزمایش متوقف شده و نمونه به عنوان نمونه نفوذ ناپذیر معرفی شد.

برای بررسی تاثیر اندودهای سنگدانه‌ای بر مقدار نفوذپذیری سطوح آسفالتی زیرین چهار نمونه ساخته شد. در نمونه اول اندود سنگدانه‌ای دو لایه بر روی آسفالت درشت دانه اجرا شده و میزان نفوذپذیری آن مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه دوم اندود سنگدانه‌ای مستقیماً بر روی اساس خاکی اجرا شد. نمونه سوم سطح توپکای معمولی پس از انجام آزمایش شیارافزادگی بود و نمونه چهارم مخلوط آسفالتی درشت دانه بود که به عنوان نمونه کنترل مورد بررسی قرار گرفت. نمونه سوم تحت اثر دستگاه ویل تراک قرار گرفت تا بتواند شرایط موجود در محل پس از چند سال را شبیه سازی نماید. میزان نفوذپذیری نمونه‌ها بر اساس قانون داریسی محاسبه می‌گردد [۱۰]. رابطه ۵ این قانون را بیان می‌کند:

$$k = \frac{V \times L}{A \times H \times t} \quad (5)$$

که در آن:

k = ضریب نفوذپذیری نمونه (cm/sec)

L = ضخامت نمونه (cm)

A = سطح مقطع نمونه (cm^2)

V = حجم آب عبوری از نمونه (cm^3)

H = هد ثابت آب (cm)

t = زمان انجام آزمایش (Sec)

نتایج به دست آمده از نمونه‌های آزمایش شده به شرح جدول ۴ است.

۷. مراجع

- measuring surface frictional properties using the British pendulum tester" Annual book of ASTM standards, vol.4.03. Philadelphia.
7. Pavement and structures "Pavement Skid Resistance: British Pendulum Method ", Main Roads, Western Australia T\WA310.1, Issue 101/1996.
 8. Towler, J.I. and Ball, G.F.A. (1999)" Permeabilities of chip seals in New Zealand ", Tran Fund Research Report No.165.
 9. Todd, A. Lynn, Ray Brown,E.and Allen Cooley,L. Jr. (1999) "Evaluation of aggregate size characteristics in stone matrix asphalt and super pave Mixtures", Transportation Research Record, V.1681, pp.19-27.
 10. American Society for Testing and Materials (1996). D3637, "Standard test method for permeability of bituminous mixtures " Annual book of ASTM standards, vol.4.03. Philadelphia.
 1. Transport Research Laboratory (1992) "Design guide for road surface dressings", Road Note 39, 3rd edition. (TRL Limited, Crowthorne)
 ۲. " آیین نامه روسازی راههای ایران "، نشریه شماره ۲۳۴، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۱.
 3. Douglas M. Colwill(1995) "U.K. design procedure for surface dressing", Transportation Research Record, V.1507, pp.13-22.
 4. TRRL (1969)"Instructions for using the portable skid resistance tester "Road Note 27, Transport and Road Research Laboratory HMSO.
 5. Cenek P.D., Jamieson N.J. and Towler J.I. (1997) "The influence of texture depth on skidding resistance", Transit New Zealand-t/10.
 6. American Society for Testing and Materials. (1996) E303, "Standard test method for

پانویس ها:

- 1-Average Least Dimension
- 2-Flakiness Index
- 3-Hardness
- 4-Polishing
- 5-Texture Depth

Archive of SID

برآورد کشتشهای تقاضای مسافر و بار در راه آهن جمهوری اسلامی ایران*

مرتضی عزتی، دانشکده اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

لطفعلی عاقلی کهنه شهری، دانشکده اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: ezzati@modares.ac.ir

چکیده

اطلاع از کشتش^۱ تقاضا، علاوه بر این که قدرت تصمیم‌گیری و انتخاب عرضه‌کنندگان خدمات را افزایش می‌دهد، می‌تواند قدرت و توان انعطاف عرضه‌کننده (از جمله عرضه‌کننده خدمات ریلی) در مقابل تأمین‌کنندگان مواد اولیه را نیز مشخص کند. اگر سازمان راه آهن از اثر هر یک از عوامل مؤثر بر تقاضای خدمات نهایی ریلی و کشتش آنها اطلاع داشته باشد، زمینه‌های مناسب‌تری را برای تصمیم‌گیری درباره عرضه زیربنا و نیز تعیین قیمت دسترسی، در اختیار خواهد داشت. در این مقاله با مروری بر مطالعات انجام شده در باره کشتشهای تقاضای بار و مسافر در کشورهای مختلف، مدل‌های گوناگونی برای تقاضای حمل و نقل ریلی در ایران تخمین زده شده است. تقاضای بار و مسافر در این مدل‌ها، تابعی از قیمت، قیمت شیوه‌های حمل و نقل جانشین، جمعیت، مقدار تولید (بر اساس ارزش افزوده)، ارزش افزوده بخشی، فاصله و نظیر آنها است. مقادیر کشتش برآورد شده با مطالعات مشابه تا حد زیادی سازگار است و حاکی از بی‌کشتش بودن (نداشتن حساسیت مقدار به قیمت) تقاضای مسافرت با راه آهن به صورت تابعی از کرایه، فاصله، جمعیت و جایگزینی آن با سفر جاده‌ای (با اتوبوس) است. همچنین تقاضای حمل بار با راه آهن به صورت تابعی از فاصله بی‌کشتش است. به عبارت دیگر، با تغییرات فاصله، مقدار تقاضا برای حمل بار تقریباً ثابت است.

واژه‌های کلیدی: کشتش تقاضا، کرایه حمل، راه آهن، بار، مسافر

۱. مقدمه

درصد تغییر در مصرف ناشی از یک درصد تغییر در قیمت، در صورت ثبات سایر شرایط، کشتش نامیده می‌شود. متناسب با مقدار واکنش تقاضا در برابر قیمت‌های خود کالا و قیمت سایر کالاها، تقاضای باکشتش، کم‌کشتش، بی‌کشتش، باکشتش واحد و کشتش متقاطع^۳ مطرح می‌شود [۱].

در بحث تقاضای سفر با توجه به تعدد و تنوع شیوه‌های سفر، علاوه بر کشتش خود قیمتی^۴، بایستی کشتش متقاطع نیز مورد نظر باشد. به عنوان مثال در کشورمان، سفر با قطار می‌تواند جایگزین سفر با اتوبوس باشد، اما کاهش کرایه اتوبوس و کاهش عوارض جاده‌ای می‌تواند منجر به افزایش سفر با اتوبوس شود.

قیمت یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تصمیم‌گیری مصرف‌کنندگان است. تغییر قیمت ممکن است مصرف‌کنندگان را به استفاده از یک محصول خاص و جایگزینی آن با کالاهای دیگر سوق دهد. هرچند تصمیم‌های افراد مختلف در زمینه مصرف با یکدیگر متفاوت هستند، اما الگوی کلی حاکم بر مصرف و تقاضا این است که با افزایش قیمت‌ها - با ثبات سایر شرایط - مقدار تقاضا باید کاهش یابد. بر اساس مبانی اقتصاد خرد و ساختار هزینه‌ای یک بنگاه، قیمت کالا یا خدمت، به هزینه نهایی (حاشیه‌ای)^۲ تولید اشاره دارد که در زمینه حمل و نقل، اعم از هزینه‌های پولی یا هزینه‌های غیربازاری دیگر از جمله زمان سفر است. حساسیت مصرف‌کننده به تغییرات قیمت یا به زبان تخصصی‌تر،

۲-۴ نوع تغییر قیمت

کرایه های حمل و نقل، کیفیت خدمات (سرعت و وسایل نقلیه، فراوانی سفر، پوشش سفرها و راحتی سفر) و قیمت گذاری پارکینگ تاثیر زیادی بر روی سفرها دارند. کشش ها با افزایش سطح کرایه ها افزایش می یابند.

۲-۵ جهت تغییر قیمت

اغلب مدل های تقاضای حمل و نقل، کشش یکسانی را برای افزایش و کاهش قیمت ها به کار می گیرند، اما شواهدی وجود دارند که نشان می دهند این تغییرات نامتقارن هستند. افزایش کرایه ها، موجب کاهش بیشتر تعداد مسافران در مقایسه با کاهش کرایه بر تعداد مسافران می شود.

۲-۶ دوره زمانی

اثرات قیمتی در بحث سفرهای فردی یا گروهی، به اثرات کوتاه مدت (کمتر از دو سال)، میان مدت (در طول پنج سال) و بلندمدت (بیش از پنج سال) طبقه بندی می شوند. کششها (به عنوان حساسیت تقاضا در برابر تغییرات قیمتها)، در طول زمان افزایش می یابند زیرا مصرف کنندگان تغییرات قیمت را در تصمیمات بلندمدت تر کار یا فراغت دخالت می دهند. به طور معمول، کشش های بلندمدت قیمتی مسافرت دو تا سه برابر کششهای کوتاه مدت هستند.

۲-۷ نوع حمل و نقل

اتوبوس و راه آهن کشش های متفاوتی دارند زیرا به بازارهای متفاوتی (مصرف کنندگان مختلفی)، خدمات می دهند، گرچه مقدار تفاوت آنها به شرایط معینی بستگی دارد. از نظر کلمنتس [3] به علت اختلاف معنی داری که بین تقاضای سفر با قطار، اتوبوس و سایر شیوه های سفر وجود دارد، کل تقاضای سفر را می توان به صورت تقاضای شکسته در نظر گرفت. در نتیجه، مقادیر کششها بستگی به ناحیه یا محدوده شکست در منحنی تقاضا دارد. اگر نظام حمل و نقل ریلی بخواهد مسافران بیشتری را جذب کند و سفر با اتومبیل را کاهش دهد، لازم است کرایه ها تنزل و خدمات بهبود یابند تا مسافران محتاط و حساس به قیمت را جلب کند.

کشش نسبت به قیمت، کاربردهای بسیاری در برنامه ریزی حمل و نقل دارد و می توان از آنها برای پیش بینی اثرات درآمدی سفر ناشی از تغییرات کرایه یا هزینه سفر با قطار یا دیگر شیوه های سفر، مدل سازی مربوط به پیش بینی اثر تغییر در خدمات حمل و نقل بر حجم ترافیک وسایل نقلیه و انتشار آلودگی ها، ارزیابی آثار و منافع راهبردهای مدیریت جابه جایی ها، عوارض جاده ای و هزینه های پارکینگ استفاده کرد.

۲. عوامل موثر بر کششهای تقاضای سفر

لیتمن [2] معتقد است که عوامل مختلفی می توانند نحوه تاثیر قیمت سفر بر تصمیمات مصرفی را بیان کنند. متناسب با چگونگی تعریف کششها، نوع کالاها یا خدمات تحت تاثیر، گروه یا طبقه مشتریان، کیفیت جایگزین ها و موارد دیگر، این عوامل متفاوت خواهند بود. لازم است هر یک از این عوامل به اجمال توضیح داده می شوند.

۱-۲ نوع متقاضی

گروههای جمعیتی معین، شامل مسافران کم درآمد، معلولین، دانش آموزان، دانشجویان و سالخوردگان، به حمل و نقل عمومی وابستگی بیشتری دارند. در اغلب کشورها، افراد متکی به حمل و نقل عمومی، سهم نسبتا کوچکی از کل جمعیت، ولی سهم بزرگی از مصرف کنندگان حمل و نقل را تشکیل می دهند.

۲-۲ نوع سفر

سفرهای شخصی یا غیر گروهی، نسبت به قیمت باکشش تر هستند (درصد تغییرات تقاضای این گونه سفرها نسبت به درصد تغییرات کرایه ها بیشتر است). این کششها برای سفرهای حمل و نقل در ساعات غیر اوج، ۱/۸ تا ۲ برابر بیش از کشش های متقاطع در ساعات ازدحام سفر هستند، زیرا سفرهای دوره ازدحام، به طور عمده شامل سفرهای گروهی هستند.

۲-۳ عوامل جغرافیایی

در شهرهای بزرگ، کشش های قیمتی سفر نسبت به شهرهای کوچک تر و حومه ای کمتر است، زیرا نسبت بزرگی از مصرف کنندگان در این نقاط شهری، وابسته به حمل و نقل هستند. حمل و نقل سرانه و سفرهای شهری به موازات افزایش اندازه شهر، افزایش ازدحام و ترافیک و بهبود خدمات افزایش می یابد.

بیشتری در ارتباط با افزایش درآمد واقعی و مالکیت اتومبیل دارند و ارتباطات جدید، جایگزین سفرهای فیزیکی می‌شوند.

جدول ۲. کشتشهای تقاضا در حمل و نقل

(نتایج مطالعه گودوین) [13]

نامشخص	بلند مدت	کوتاه مدت	دوره / متغیر
-	-۰/۵۵	-۰/۲۸	تقاضای اتوبوس به صورت تابعی از کرایه آن
-	-۱/۰۸	-۰/۶۵	تقاضای راه آهن به صورت تابعی از کرایه آن
۰/۳۴	-	-	حمل و نقل عمومی به صورت تابعی از قیمت بنزین
۰/۳ تا ۰/۱	-	-	مالکیت خودرو به صورت تابعی از هزینه های حمل و نقل عمومی
-۰/۵۳	-۰/۷۱	-۰/۲۷	مصرف بنزین به صورت تابعی از قیمت بنزین
-	-۰/۳۳	-۰/۱۶	سطوح ترافیک به صورت تابعی از قیمت بنزین

دارگی و هانلی^۶، اثرات تغییرات کرایه اتوبوسها را در انگلستان طی چند سال برای به دست آوردن مقادیر کشتش مطالعه کرده‌اند. آنها یک مدل اقتصادسنجی پویا (با تفکیک اثرات کوتاه مدت و بلندمدت) از مشتریان (متقاضیان) اتوبوس، درآمد سرانه، کرایه اتوبوسها و سطح خدمات را به کار برده‌اند و دریافته‌اند که مقدار تقاضا حساسیت نسبتاً کمی به افزایش کرایه‌ها (۰/۴- در کوتاه مدت و ۰/۷- در بلندمدت) در مقایسه با کاهش کرایه‌ها (۰/۳- در کوتاه مدت و ۰/۶- در بلندمدت) دارد^۷ و همچنین تقاضا در سطوح کرایه بالاتر، به قیمت‌ها حساس‌تر است (یعنی اگر کرایه‌ها بیشتر افزایش یابند یا درصد تغییرات آنها بیشتر باشد، مقدار عددی کشتش تقاضا بزرگتر خواهد بود).

آنها نتیجه گرفته‌اند که کشتش متقاطع تقاضای اتوبوس به صورت تابعی از هزینه‌های عملیاتی، در کوتاه مدت ناچیز است، ولی در بلندمدت به ۰/۳ تا ۰/۴ افزایش می‌یابد و کشتش بلندمدت مالکیت خودرو به صورت تابعی از کرایه حمل و نقل برابر ۰/۴ است در حالی که کشتش مصرف خودرو به صورت تابعی از کرایه‌های حمل و نقل برابر ۰/۳ است.

۳. پیشینه مطالعات

مطالعات زیادی در زمینه کشتشهای تقاضای حمل و نقل انجام شده‌اند. در اینجا ابتدا به برخی مطالعات خارجی، سپس مطالعات داخلی می‌پردازیم.

۱-۳ مطالعات خارجی

از جمله این مطالعات به موارد زیر می‌توان اشاره کرد: در مورد کشتش‌های کرایه اتوبوس، یک قاعده سرانگشتی موسوم به قاعده سیمپسون - کورتین^۵ در مباحث حمل و نقل وجود دارد که می‌گوید: به ازای هر ۳ درصد افزایش در کرایه حمل و نقل، تعداد مسافران حدود یک درصد کاهش می‌یابد. جدول (۱) مقادیر کشتش کرایه اتوبوس را که توسط اتحادیه حمل و نقل عمومی آمریکا^۶ انتشار یافته است نشان می‌دهد. این کشتش‌ها که در برنامه‌ریزی و مدل‌سازی حمل و نقل در آمریکای شمالی ملاک قرار گرفته‌اند، حاصل مطالعه بر روی اثرات کوتاه مدت تغییرات کرایه در ۵۲ نظام حمل و نقل آمریکا (متناسب به ۵۲ ایالت آمریکا)، در طول دهه ۱۹۸۰ هستند. این ضرایب، آثار کوتاه مدت را منعکس می‌کنند و مبتنی بر دوره‌ای هستند که بخش بزرگی از جمعیت متکی به حمل و نقل بوده‌اند و بر این اساس، اثرات بلندمدت تغییرات قیمتی را کمتر از حد واقعی برآورد می‌کنند.

جدول ۱. کشتشهای قیمتی تقاضای سفر با اتوبوس (گزارش

اتحادیه حمل و نقل عمومی آمریکا) [4]

شهرهای کوچک (کمتر از یک میلیون نفر)	شهرهای بزرگ (بیش از یک میلیون نفر)	
-۰/۴۳	-۰/۳۶	میانگین تمام ساعات
-۰/۲۷	-۰/۱۸	ساعات اوج سفر
-۰/۴۶	-۰/۳۹	ساعات غیر ازدحام
-۰/۴۲		میانگین ساعات غیر ازدحام
-۰/۲۳		میانگین ساعات اوج سفر

گودوین [5]، پس از مروری مفصل بر مطالعات بین‌المللی، مقادیر میانگین کشتشهای قیمتی حمل و نقل را به صورت جدول (۲) ارائه کرده است. وی خاطر نشان می‌کند که آثار قیمتی، در طول زمان افزایش می‌یابند، زیرا در بلندمدت، مصرف‌کنندگان گزینه‌های

جدول ۳. کششهای قیمتی تقاضای اتوبوس

(نتایج مطالعه دارگی و هانلی) [6]

نوع کشش	کوتاه مدت	بلندمدت
غیر شهری	۰/۲ تا ۰/۳	۰/۸ تا ۱
شهری	۰/۲ تا ۰/۳	۰/۴ تا ۰/۶

گیلین [8]، برآوردهای مربوط به کششهای کرایه را برای گروههای مختلف مصرف کننده و انواع سفرها، خلاصه کرده و نشان داده است که عوامل متعدد، چگونگی بر کششهای قیمتی حمل و نقل مؤثرند. جدول (۵) نشان می دهد که مالکان خودروها، نسبت به افرادی که وابسته به حمل و نقل هستند (با کشش نسبت به کرایه معادل ۰/۱-)، کشش بیشتری دارند (۰/۴۱-). سفرهای کاری از سفرهای به منظور خرید از حساسیت کمتری برخوردارند.

جدول ۵. کششهای کرایه در گروههای مختلف مصرف کننده

(نتایج مطالعه گیلین) [8]

عامل	کشش
کرایه های سراسری حمل و نقل	۰/۳۳ تا ۰/۲۲-
سوارشدگان زیر ۱۶ سال	۰/۳۲-
سوارشدگان بین ۱۷ تا ۶۴ سال	۰/۲۲-
سوارشدگان بالاتر از ۶۴ سال	۰/۱۴-
افراد با دریاقتی زیر ۵۰۰۰ دلار	۰/۱۹-
افراد با دریاقتی بیش از ۱۵۰۰۰ دلار	۰/۲۸-
مالکان خودرو	۰/۴۱-
افراد بدون خودرو	۰/۱-
سفرهای کاری	۰/۱ تا ۰/۱۹-
سفرهای به منظور خرید	۰/۳۲ تا ۰/۴۹-
سفرهای غیر ازدحام	۰/۱۱ تا ۰/۸۴-
سفرهای اوج	۰/۳۲ تا ۰/۰۴-
سفرهای کمتر از یک مایل	۰/۵۵-
سفرهای بیش از ۳ مایل	۰/۲۹-

لوک وهپورن [9]، کششهای تقاضای مسافرت در استرالیا را با مروری بر مطالعات ملی و بین المللی متعدد خلاصه کرده اند. جدول ۶ نتایج این بررسی را نشان می دهد.

جدول ۶. کششهای تقاضای مسافرت در استرالیا

(نتایج مطالعه لوک وهپورن) [9]

متغیر	دوره	کوتاه مدت	بلند مدت
تقاضای اتوبوس و کرایه		۰/۲۹-	
تقاضای ریلی و کرایه		۰/۳۵-	
تقاضای کرایه جاده ای و نسبت هزینه جاده ای به ریلی		۰/۳۹-	۰/۵۸-
مصرف بنزین و قیمت بنزین		۰/۱۲-	
سطح مسافرت و قیمت بنزین		۰/۱۰-	

دارگی و همکاران [7]، در مطالعه دیگری کششهای حمل و نقل را در فرانسه و انگلستان بین سالهای ۱۹۷۵ و ۱۹۹۵ مقایسه کرده اند. این مطالعه نشان می دهد که تعداد مسافران به موازات درآمد و کرایه بیشتر و نیز با کاهش مسافت پیموده شده کاهش می یابد. این پژوهشگران، دریافته اند که کششهای حمل و نقل در طول دوره افزایش یافته اند. جدول (۴) این یافته ها را خلاصه کرده است.

جدول ۴. کششهای حمل و نقل در انگلستان و فرانسه

(نتایج مطالعه دارگی و همکاران) [7]

کششها	انگلستان		فرانسه		متغیرها
	لگاریتمی دوطرفه	نیمه لگاریتمی	لگاریتمی دوطرفه	نیمه لگاریتمی	
درآمد	۰/۶۷-	۰/۶۹-	۰/۰۵-	۰/۰۴-	کوتاه مدت
	۰/۹-	۰/۹۵-	۰/۰۹-	۰/۰۷-	بلندمدت
کرایه	۰/۵۱-	۰/۵۴-	۰/۳۲-	۰/۰۳-	کوتاه مدت
	۰/۶۹-	۰/۷۵-	۰/۶۱-	۰/۵۹-	بلندمدت
مسافت پیموده شده	۰/۵۷	۰/۵۴	۰/۲۹	۰/۲۹	کوتاه مدت
	۰/۷۷	۰/۷۴	۰/۵۷	۰/۵۷	بلندمدت
	نرخ رشد سالانه کشش کرایه		۰/۶۶ درصد		۰/۵۹ درصد

با یک تابع لگاریتمی دوطرفه^۸، مقادیر کششها، در تمام سطوح کرایه مشابه هستند در حالی که با یک تابع نیمه لگاریتمی^۹، مقادیر کششها، با افزایش کرایه ها افزایش می یابند. مقادیر کشش نیمه لگاریتمی، مبتنی بر یک تابع نمایی هستند و برای پیش بینی اثرات کرایه هایی که به سمت صفر میل می کنند، قابل استفاده هستند، یعنی اگر خدمات حمل و نقل، مجانی باشد. ولی این نوع توابع، در سطوح کرایه بسیار زیاد، مناسب نیستند زیرا در این مورد فرم نیمه لگاریتمی، منجر به مقادیر کشش اغراق آمیز می شود. به ازای تغییرات نوعی کرایه ها، بین ۱۰ تا ۳۰ درصد، توابع لگاریتمی دوطرفه و نیمه لگاریتمی، نتایج یکسانی به بار می آورند.

عیدانی [۱۳]، در برآورد تقاضای سفر توسط راه آهن عوامل موثر را تولید ناخالص داخلی و جمعیت در نظر گرفته و در طول سالهای مورد مطالعه (۱۳۶۹-۱۳۵۰)، کشتشهای تقاضای سفر را به صورت تابعی از دو متغیر اخیر به ترتیب ۱/۱ و ۰/۴۵ برآورد کرده است. وی همچنین در تخمین تقاضای حمل بار توسط راه آهن عوامل موثر را شامل تولید ناخالص داخلی و روند زمانی در نظر گرفته و کشتشهای تقاضا را به صورت تابعی از تولید ناخالص داخلی و ضریب متغیر روند به ترتیب ۰/۲۱ و ۰/۰۷ به دست آورده است.

کلباسی انارکی [۱۴]، در تخمین تقاضای حمل و نقل شهری تهران به مدل‌های جاذبه متوسل شده و تعداد سفرهای شهری را در مناطق بیست گانه تهران به جمعیت شاغل در هر منطقه، تعداد مشاغل موجود در هر منطقه و میانگین زمان سفر ارتباط داده است. وی برای کل سفرها، سفرهای با اتوبوس و سفر با تاکسی، کشتشهای زیر را به دست آورده است:

جدول ۷. کشتشهای تعداد سفرهای شهری

در مناطق بیست گانه تهران [۱۴]

کل سفرها	سفر با اتوبوس	سفر با تاکسی	
۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۶	جمعیت شاغل در هر منطقه
۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۹	تعداد مشاغل در هر منطقه
-۱/۳۵	-۱/۰۴	-۰/۴۹	میانگین زمان سفر

۴. تخمین مدل تقاضا و کشتشهای تقاضای سفر با راه آهن

بر اساس مباحث نظری، تقاضای مسافرت تابعی از عواملی مانند فاصله، کرایه شیوه حمل و نقل، جانشین، جمعیت منطقه و عوامل جاذب و دافع دیگر است. در این خصوص، باید به یاد داشت که این تقاضا از نوع تقاضای بالفعل و تحقق یافته است و نمی‌تواند بخش اعظم تقاضای بالقوه را توضیح دهد اما، می‌تواند دورنمایی از اثر متغیرهای مستقل را بر تقاضای مسافرت ریلی ارائه دهد. مدل تقاضای سفر با راه آهن در ایران را به صورت زیر تخمین می‌زنیم:

لی و همکاران [10]، کشتشهای قیمتی تقاضای مسافرت با وسایل نقلیه مسافری را در کره جنوبی با استفاده از الگوی ترجیحات بیان شده^{۱۰}، تخمین زده‌اند و اثرات سیاستهای فرضی مدیریت تقاضای مسافرت را به صورت تابعی از کشتشها بررسی کرده‌اند. بنا بر محاسبات آنها، کشتش تقاضای مسافرت با وسایل نقلیه مسافری به صورت تابعی از قیمت سوخت، در دامنه ۰/۰۷۸- تا ۰/۱۷۱- تعیین شده است و نشان می‌دهد که سیاستهای مربوط به تعیین کرایه، در افزایش سهم روشهای دیگر ترابری در کره جنوبی، نسبتاً بی‌تاثیر است. علاوه بر این، واکنش دارندگان خودرو به تغییر در هزینه های پارکینگ، بسیار بیشتر از هزینه سوخت برآورد شده است.

۲-۳ مطالعات داخلی

در داخل کشور نیز پژوهشهای مختلفی در زمینه تقاضای سفر یا به طور کلی تقاضای حمل و نقل انجام شده است که در زیر به طور خلاصه بیان می‌شوند:

حسینی [۱۱]، بر مبنای آمار مقطعی سال ۱۳۷۰ و آمار تلفیقی سالهای ۱۳۶۷ تا ۱۳۷۰ با تبدیل لگاریتمی بر روی داده‌ها، تابع تقاضای سفر هوایی را تخمین زده است. وی عواملی از قبیل جمعیت شهری و درآمد سرانه شهری را به عنوان عوامل مولد سفر، تعداد مشاغل کارگاههای صنعتی را به عنوان عامل جذب سفر و هزینه سفر را به عنوان عامل دفع (بازدارنده) سفر شناسایی کرده است و در بین مدل‌های مختلفی که برای تصریح^{۱۱} تقاضای سفر هوایی در نظر گرفته است، ضرایب کشتش تقاضای سفر به صورت تابعی از درآمد، جمعیت و مسافت را به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۱۲ و ۰/۶۵- محاسبه کرده است.

دامیار [۱۲]، در تخمین تابع تقاضای حمل و نقل جاده ای کالا از استان هرمزگان بر مبنای آمار سال ۱۳۷۵ و با تبدیل لگاریتمی بر روی داده‌ها، از مدل جاذبه استفاده کرده و عواملی از قبیل جمعیت، ارزش مواد اولیه وارداتی مورد نیاز کارگاههای صنعتی، تولید ناخالص داخلی استانها را به عنوان عوامل جذب بار و فاصله استانها از استان هرمزگان را به عنوان عامل بازدارنده تقاضای بار تعریف کرده و برای کل بارهای صنعتی و کشاورزی، کشتش تقاضای حمل و نقل جاده ای را نسبت به جمعیت، ارزش مواد اولیه وارداتی و مسافت به ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۴۸ و ۰/۶۶- به دست آورده است.

نزدیک به عدد ۲ درآمده و احتمال وجود نداشتن خودهمبستگی را تقویت می کند، اما نمی توان به آن اعتماد کرد زیرا مدل به صورت خودرگرسیون^{۱۵} و با فرض الگوی انتظارات تطبیقی^{۱۶} تخمین زده شده است، لذا در این مقاله از آزمون ضریب لاگرانژ^{۱۷} (LM) که توسط بروش-گودفری [16,15] در سال ۱۹۷۸ پیشنهاد شده، استفاده شده است. در این آزمون، پس از انجام رگرسیون OLS، جملات باقیمانده (پسماند) آن روی تمام متغیرهای مستقل و وقفه های (تاخیرات)^{۱۸} مختلف این جملات به صورت زیر برازش می شود:

(۲)

$$e_t = \beta_0 + \beta_1 x_{1t} + \beta_2 x_{2t} + \dots + \lambda_1 e_{t-1} + \lambda_2 e_{t-2} + \dots$$

که x ها و e ها به ترتیب متغیرهای مستقل و جملات پسماند را نشان می دهند. اگر تعداد وقفه های (تاخیرات) رگرسیون فوق، ρ باشد، آزمون مذکور به آماره ای منجر می شود که توزیع χ^2 دارد:

$$nR^2 \approx \chi^2(\rho)$$

نرم افزار Eviews^{۱۹} مقدار nR^2 را محاسبه می کند که با مقدار $\chi^2(\rho)$ از جدول مربوطه قابل مقایسه است. حال اگر $nR^2 < \chi^2(\rho)$ باشد خودهمبستگی وجود ندارد. nR^2 محاسبه شده در مدل اصلی، با تعداد ۲ و ۵ وقفه در سطح اطمینان ۹۹ درصد به ترتیب ۵/۶۴ و ۸/۱۹ بوده است، در حالی که مقادیر $\chi^2(5)$ و $\chi^2(2)$ جدول به ترتیب ۹/۲۱ و ۱۵/۰۸ به دست آمده اند، به این ترتیب وجود خودهمبستگی تایید نمی شود. بر اساس ضرایب به دست آمده می توان مقادیر کشش کوتاه مدت و بلندمدت تقاضای سفر با قطار را نسبت به هر یک از متغیرهای مستقل تعیین کرد. جدول (۸) این کششها را نشان می دهد.

جدول ۸. کششهای تقاضای سفر با قطار در ایران

کشش بلندمدت	کشش کوتاه مدت	نوع کشش (نسبت به)
-۰,۹۶۲	-۰,۳۲۸	کرایه جابه جایی با قطار
۰,۵۹۲	۰,۲۰۲	کرایه جابه جایی با اتوبوس
-۰,۶۰۱	-۰,۲۰۵	فاصله
۰,۵۴۵	۰,۱۸۶	جمعیت منطقه

(۱)

$$\ln NPas_t = C_1 + C_2 \ln NPas_{t-1} + C_3 \ln Pra_t + C_4 \ln Pbu_t + C_5 \ln Dis_t + C_6 \ln POP_t$$

که در آن:

Ln = علامت لگاریتم نپری،

t = نماد زمان (سالهای مورد بررسی)،

NPas = تعداد سفرهای فردی انجام شده از منطقه،

C_1 تا C_6 = ضرایب ثابت،

Pra = کرایه متوسط هر نفر - کیلومتر سفر با قطار از منطقه،

Pbu = کرایه متوسط هر نفر - کیلومتر سفر با اتوبوس از منطقه،

Dis = متوسط فاصله منطقه تا مقاصد ریلی دیگر، و

POP = جمعیت منطقه مبدا است.

مناطق دارای خطوط راه آهن در ایران، بر حسب مبدأ حرکت، شامل مناطق جنوب، لرستان، اراک، تهران، شمال، شمال شرق، خراسان، شمال غرب، آذربایجان، اصفهان، جنوب شرق و هرمزگان هستند.

نتایج تخمین مدل بر اساس داده های ماهیانه در فاصله سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۰^{۱۲} به وسیله روش حداقل مربعات معمولی^{۱۳} (OLS) به صورت زیر است:

نام متغیر	ضریب تخمین زده شده	آماره t
عرض از مبدأ C_1	۶/۰۰۱	۳/۱۲
$Ln Pas_{t-1}$	۰/۶۵۹	۷/۶۲
$Ln Pra_t$	-۰/۳۲۸	-۱/۵۲
$Ln Pbu_t$	۰/۲۰۲	۱/۷۸
$Ln Dis_t$	-۰/۲۰۵	-۱/۴۶
$Ln Pop_t$	۰/۱۸۶	۱/۹

$$N = 60 \quad \hat{R}^2 = 0.72 \quad F = 29.7 \quad DW = 1.55$$

بر اساس جدول فوق، آماره t (حاصل تقسیم ضریب برآورد شده بر انحراف معیار آن) رانشان می دهند. مطابق نتایج به دست آمده، ضرایب اغلب متغیرها در سطح اطمینان ۹۵ درصد و ضریب متغیر فاصله در سطح ۸۰ درصد معنی دار بوده^{۱۴} و آماره های ضریب تعیین و F، حاکی از برازش خوب مدل هستند. اما نکته قابل توجه در مدل فوق این است که هرچند آماره دربین واتسون (D.W.)

Ln = علامت لگاریتم نپری،
 Tonage = تناژ بار حمل شده از منطقه، و
 Dis = فاصله تا مقاصد ریلی دیگر است.

در اینجا نیز، آماره در بین - واتسون محاسبه شده قابل اتکا نیست و با کمک آزمون ضریب لاگرانژ، مقدار nR^2 در اینجا با ۰/۲ و وقفه به ترتیب ۱/۹۴ و ۸/۷۶ درآمده که از $\chi^2(5)$ و $\chi^2(2)$ جدول χ^2 در سطح اطمینان ۹۹ درصد کوچکتر و بیانگر نداشتن خودهمبستگی در مدل فوق است.

ضریب کشتش بعد مسافت برای تقاضای حمل بار نیز ۰/۴۶۹- است، یعنی به ازای هر یک درصد کاهش مسافت ۰/۴۶۹ درصد بر تقاضای حمل بار با قطار افزوده می شود. این ضریب از نظر آماری معنی دار است، یعنی فاصله، تاثیر منفی و معنی داری بر تقاضای حمل بار با قطار دارد و تقاضای حمل بار با قطار نسبت به فاصله بی کشتش است (کوچکتر از یک و برابر ۰/۶۵۳ است) و ضریب معنی دار تناژ با وقفه (ضریب متغیر LnTonage_t)، سلطه سازوکار انتظارات مناسب بر شیوه حمل بار با قطار را تایید می کند.

بر این اساس در بخش مسافری، تقاضای حمل و نقل از طریق راه آهن برای عوامل یاد شده کم کشتش است. با توجه به این که کشتش قیمتی تقاضای سفر با قطار بین صفر و ۱- قرار دارد، سفر با قطار کالایی ضروری محسوب می شود [۱۷]. در این جا مهم ترین عامل سیاستگذاری، کرایه یا قیمت بلیط مسافری و پس از آن فاصله است، به نحوی که یک درصد افزایش قیمت بلیط مسافری - با ثبات سایر شرایط - موجب کاهش ۰/۳۲۸ درصدی در تقاضای سفر با قطار می شود. همچنین با افزایش فاصله (طول مسیر)، مسافران به دنبال روشهای جایگزین می روند.

در مدل فوق عوامل قیمت بلیط اتوبوس و جمعیت از عوامل اثرگذار دیگرند، به طوری که با افزایش اندازه جمعیت و نیز افزایش کرایه اتوبوسها، هر کدام به میزان یک درصد، به ترتیب ۰/۱۸۶ درصد و ۰/۲۰۲ درصد بر میزان تقاضای سفر با قطار افزوده می شود و مطابق انتظار، سفر با قطار یا با اتوبوس جانشین یکدیگر محسوب می شوند. نتایج مدل با دیگر مطالعات خارجی و داخلی در مورد تقاضای سفر بار راه آهن سازگاری دارد و آنها را تایید می کند.

۵. تخمین مدل تقاضا و کشتشهای تقاضای حمل

بار یا راه آهن

بر اساس مباحث نظری، تقاضای حمل بار به طور کلی تابعی از وضعیت اقتصادی منطقه، کرایه حمل بار، کرایه درروش جایگزین، مسافت (فاصله) و عوامل جاذب و دافع دیگر است. اما در برآورد مدل، متغیرهای مؤثر، فاصله بین مبادی و مقصدهای بارگیری و تخلیه بار و تداوم حمل بار با قطار است که مورد اخیر از طریق یک الگوی انتظارات مناسب^{۲۰} در مدل گنجانده شده است و سایر متغیرها تاثیر معنی داری بر تقاضای حمل بار نداشته اند. مدل برآورد شده بر اساس داده های ماهیانه در فاصله سالهای ۱۳۸۰-۱۳۷۶ با کمک روش حداقل مربعات معمولی به صورت زیر است:

نام متغیر	ضریب تخمین زده شده	آماره t
عرض از مبدأ C_1	۰/۵۳	۴/۳۱
LnTonage_{t-1}	۰/۶۵۳	۷/۶
LnDis_t	۰/۴۶۹	-۳/۳۱

$$N = 60 \quad \hat{R}^2 = 0.63 \quad F = 50 \quad D.W = 1.65$$

که در آن:

۶. نتیجه گیری

بر اساس آنچه بیان شد، تقاضای نقل و انتقال مسافر از طریق راه آهن تابعی منفی از کرایه و بعد مسافت است. همچنین تغییرات قیمت بلیط (کرایه) سفر با اتوبوس به عنوان اصلی ترین جایگزین قطار اثر مثبت بر مقدار تقاضای سفر با قطار دارد. جمعیت منطقه مبدأ نیز این اثر را دارد. بر این اساس می توان گفت که اگر کرایه قطار افزایش یابد انتظار می رود که تقاضای سفر کاهش یابد. همچنین با افزایش کرایه سفر با اتوبوس (بین شهری)، تقاضای سفر با قطار افزایش می یابد. دو نکته قابل توجه که به ساختار مناطق باز می گردد، یکی جمعیت و دیگری فاصله با سایر مراکز جمعیتی است که بر اساس نتایج تابع تقاضای تخمین زده شده، اگر جمعیت منطقه بیشتر باشد تقاضای سفر با قطار به صورت مؤثری افزایش می یابد. همچنین تقاضای سفر با قطار برای مناطق دور از مراکز جمعیتی بیشتر از مناطق نزدیک به مراکز جمعیتی دیگر است.

ضرایب کشتش برآورد شده نشان می دهد کشتش تقاضای مسافر بر حسب کرایه قطار ۰/۳۲۸- است و کشتش تقاضا بر حسب فاصله نیز ۰/۲۰۵- است که از لحاظ سیاستگذاری اهمیت کمتری از قیمت دارد. کشتش کرایه اتوبوس نیز ۰/۲۰۲ و کم است. همچنین

6. Dargay, Joyce and Hanly, Mark (1999) "Bus fare elasticities", ESRC Transport Studies Unit, University College London. In: www.ucl.ac.uk.
7. Dargay, Joyce, Hanly, Mark, Bresson, G. M. Boulahbal, M., J.L. Madre, J.L. and Pirotte, A. (2002) "The main determinants of the demand for public transit: A comparative analysis of Great Britain and France", ESRC Transport Studies Unit, University College London, In: www.ucl.ac.uk.
8. Gillen, David (1994) "Peak pricing strategies" Transportation, Utilities, and Telecommunications: Lessons for Road Pricing. Curbing Gridlock. pp. 115-151, TRB. In: www.trb.org.
9. Luk, James and Hepburn, Stephen (1993) "New Review of Australian travel demand elasticities" Australian Road Research Board. In: www.arrb.org.au.
10. Lee, Sungwon, Lee, Yeong Heok and Hyung Park, Jee (2002) "Estimating price and service elasticity of urban transportation demand with stated preference technique: a case in Korea. In: www.koti.re.kr/project/coop.nsf/.../urban.df

کشش جمعیت نیز کم و برابر ۰/۱۸۶ است. ضرایب مذکور از نظر آماری در سطح اطمینان قابل توجهی معنی دار هستند. برای تقاضای بار مهم‌ترین عامل موثر، بعد مسافت است. برای مسافت‌های نزدیک‌تر، تقاضای سفر بیشتر است (این نکته که بارهای به مقاصد طولانی‌تر، بیشتر با قطار حمل می‌شوند درست است اما مطابق نظریه‌های اقتصاد حمل و نقل، عامل مسافت یا دوری مسیر، به طور کلی، عاملی منفی در برابر جابه‌جایی‌ها تلقی می‌شود و مدل ما نیز چنین پاسخ داده است). در این زمینه نکته قابل توجه این است که تقاضای حمل بار از طریق راه‌آهن به طور مؤثر تابعی از کرایه حمل آن و کرایه حمل بار با کامیون (جاده‌ای) نبوده‌اند. به عبارت دقیق‌تر صرف‌نظر از کرایه حمل بار با راه‌آهن یا وسایط نقلیه جاده‌ای، تقاضا همیشه برای حمل بار وجود دارد و متاثر از قیمت نیست، هر چند این دو شیوه ترابری، جایگزین نزدیک یکدیگر محسوب می‌شوند. مقایسه نتایج این مقاله با مطالعات داخلی و خارجی حاکی از تاثیر متغیرهای اصلی، شامل قیمت (کرایه حمل بار یا مسافر)، مسافت، جمعیت و نیز عادت کردن به یک سبک مسافرت خاص (تطبیق دادن خود با شرایط)، بر تقاضای سفر با راه‌آهن و یا حمل بار با خطوط ریلی است.

۶. مراجع

۱۱. حسینی، رضا (۱۳۷۳) "تخمین تابع تقاضای سفر هوایی در ایران و بررسی عوامل موثر بر آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
۱۲. دامیار، هوشنگ (۱۳۷۷) "تخمین تابع تقاضای حمل و نقل جاده‌ای استان هرمزگان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
۱۳. عیدانی، مصطفی (۱۳۷۱) "برآورد تقاضای بار و مسافر از طریق راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
۱۴. کلباسی انارکی، ناهید (۱۳۶۸) "تقاضای حمل و نقل شهری تهران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
15. Breusch, T.S. (1978) "Testing for autocorrelation in dynamic linear models", Australian Economic Papers, Vol 17, pp. 334-355.

۱. مهرگان، نادر (۱۳۸۲). "اقتصاد خرد". همدان، انتشارات خواجه رشید، چاپ اول.
2. Litman, Todd (2004). "Transit price elasticities and cross-elasticities". Victoria Transport Policy Institute, In: www.vtpi.org
3. Clements, Harry (1997) "A new way to predict transit demand". Journal of Mass Transit. , July/Aug., pp.49-52.
4. Pham, Larry and Linsalata, Jim (1991) "Effects of fare changes on bus rider ship", American Public Transit Association (Washington DC; In: www.apta.com.
5. Goodwin, Phil (1992) "Review of new demand elasticities with special reference to short and long run effects of price changes", Journal of Transport Economics, Vol. 26, No. 2, pp.155-171.

۹- در این توابع ممکن است متغیر وابسته یا متغیرهای مستقل به صورت لگاریتمی باشند ولی همه آنها به صورت لگاریتمی نیستند.

10- Stated Preference Model (SPM)

11- Specification

۱۲- داده‌های این تحقیق از گزارشهای آماری سالانه راه آهن ج.ا.ا. استخراج شده است.

13- Ordinary Least Squares

۱۴- در باره متغیر فاصله به یک نکته اساسی باید توجه کرد:

فاصله بیان شده بر حسب بعد مسافت بین دو منطقه ریلی است به عنوان مثال سفر با اتوبوس یا خودرو بین تهران تا قم سریع‌تر از سفر با قطار صورت می‌گیرد و همچنین فاصله اندیمشک با اهواز و... لذا ضریب متغیر فاصله منفی درآمده است.

15- Auto-Regressive

۱۶- در مدل انتظارات تطبیقی، عوامل اقتصادی بر اساس عملکردهای گذشته، رفتار خود را شکل داده و خود را با شرایط جدیدسازگار می‌کنند.

17- Lagrange Multiplier

18- Lags

۱۹- این نرم افزار، نسخه جدید بسته سریهای زمانی (TSP7) و تحت Windows می‌باشد که قابلیت‌های آماری و اقتصادسنجی زیادی دارد.

20- Adaptive Expectations

16. Godfrey, L.G. (1978) "Testing against general autoregressive and moving average error models when the regressors include lagged dependent variables", *Econometrica*, Vol 46, pp.1293-1302.

۱۷. پژویان، جمشید (۱۳۷۸) "اقتصاد خرد"، تهران، انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ هشتم.

پانویس‌ها:

۱- Elasticity: این اصطلاح، در علم اقتصاد برای بیان درصد تغییرات یک متغیر در برابر درصد تغییرات متغیر دیگر به کار می‌رود. برای مثال، کشتش تقاضا، درصد تغییرات مقدار تقاضا در قبال درصد تغییرات قیمت را نشان می‌دهد.

2-Marginal Cost

3-Cross Elasticity

4-Own Price Elasticity

5- Simpson – Curtin

6- American Public Transport Association (APTA)

۷- در واقع علایم ارقام مذکور درست است. چون در شرایط کاهش کرایه ها، مقدار تقاضا (مطابق قانون تقاضا) افزایش می‌یابد و لذا علامت کشتش منفی خواهد بود. بر عکس، با افزایش کرایه ها، از میزان تقاضا کاسته می‌شود و باز علامت کشتش، منفی است.

۸- در این توابع، تمام متغیرهای مستق و وابسته به صورت لگاریتمی بیان می‌شوند.

Archive of SID

بررسی تاثیر میزان سیلیس و آلومین موجود در مواد افزودنی بر روند تثبیت ماسه‌های روان*

ابوالفضل حسنی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محسن صالحی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: hassani@modares.ac.ir

چکیده

مناطق وسیعی از کشور ایران، شامل دشتهای ماسه روان است که همه ساله حرکت این ماسه‌ها، علاوه بر عوارض اجتماعی و بهداشتی که برای حاشیه نشینان این بسترها ایجاد می‌کند، خسارات مالی جبران ناپذیری نیز برای مسیرهای راه و راه آهن موجود و در معرض حرکت این ماسه‌ها به بار می‌آورد. در حال حاضر سطح بیابانها، کویرها و شنزارهای کشور ۳۴ میلیون هکتار و مراتع فقیر کویری ۱۶ میلیون هکتار بر آورد می‌شود که از این مقدار ۱۲ میلیون هکتار سطح شنزارهای کشور بوده که ۵ میلیون هکتار آن ماسه‌ها و شنهای روان و فعال اند. بنابراین با سطح وسیعی از این بسترها مواجه هستیم که به ناچار در پروژه‌های راه سازی با آنها برخورد می‌کنیم و باید تمهیدات مناسبی برای مقابله با آن اندیشیده شود. در این تحقیق سعی شده که با بکارگیری دو نوع پوزولان با درصدهای سیلیس و آلومین متفاوت، اثر تثبیتی این عناصر را بر خاکهای آزمایشی مورد بررسی قرار دهیم تا تاثیر هر یک از این عناصر بر مقدار مقاومت نهایی و زمان عمل آوری مفید جهت کسب مقاومت در این نوع خاکها مشخص شود.

واژه‌های کلیدی: ماسه‌های روان، تثبیت، مواد افزودنی، پوزولان‌ها

۱. مقدمه

(تعیین درصد آهک بهینه) و همچنین آزمایش‌های تعیین حداکثر دانسیته خشک خاک (تعیین درصد رطوبت بهینه) انجام و نتایج منعکس شده‌اند. در مرحله بعدی، آزمایش‌های تعیین چگونگی کسب مقاومت خاکهای تثبیت شده (آزمایش‌های CBR و مقاومت فشاری تک محوری) در برابر درصدهای مختلف پوزولان‌های تراس و دوده سیلیس با زمانهای مختلف عمل‌آوری طبق استانداردهای ذکر شده جهت تعیین میزان مقاومت ایجاد شده در این خاکها انجام شده‌اند. نهایتاً در انتهای مقاله بحث و تحلیل نتایج در زمینه تثبیت این خاکها و نتیجه گیری ارائه می‌شود.

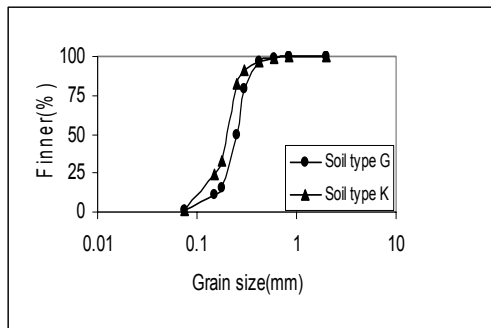
۲. پیشینه تحقیقات و تجربیات کشورهای دیگر

در این تحقیق از ترکیب پوزولان و آهک برای تثبیت خاکهای حاوی ماسه استفاده شده است. آهک از متداول‌ترین مواد افزودنی برای تثبیت خاکهای مساله‌دار است که تجربیات بسیار زیادی از استفاده آن در نقاط مختلف دنیا وجود دارد. پوزولان نیز یک ماده افزودنی بسیار ارزان و منبع غنی سیلیس و آلومین است. هدف از انجام این تحقیق بررسی چگونگی تاثیر درصد عناصر سیلیسی و آلومین موجود در مواد افزودنی، بر روند تثبیت این خاکهاست [۱]. در این مقاله ابتدا مصالح مصرفی معرفی شده، آزمایش‌های تعیین pH مطلوب واکنشهای پوزولانی در خاکهای مورد نظر

۱-۳ خاکهای مصرفی

در این تحقیق دو نوع خاک ماسه‌ای از مناطق کویری استفاده شده‌اند. خاک نوع K از اطراف کاشان با طول جغرافیایی ۵۱/۵ درجه و عرض ۳۴ درجه و خاک نوع G از اطراف گرمسار با طول جغرافیایی ۵۲/۵ درجه و عرض ۳۵ درجه تهیه شده است (در این تحقیق منظور از خاک نوع K، ماسه تهیه شده از اطراف کاشان و منظور از خاک نوع G، ماسه تهیه شده از اطراف گرمسار است). [۱]

برای شناخت بیشتر نحوه دانه بندی این خاکها، آزمایش دانه بندی طبق استاندارد ASTM D ۴۲۱-۸۷ انجام شده [۳] نتایج آن در شکل ۱ مشخص است.



شکل ۱. نتایج آزمایش دانه بندی (خاکهای نوع K و G)

براساس شکل ۱، اکثر ذرات تشکیل دهنده این خاک ها تقریباً هم اندازه بوده و ذرات ریزدانه (رس و لای) در آنها بسیار کم است. به همین علت این نوع خاکها به هیچ وجه دارای خاصیت خمیری نیستند و بنابراین نیازی به انجام آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ ندارند. همچنین علت هم اندازه بودن اکثر ذرات این نوع ماسه ها را می توان در حمل و جابه‌جایی آنها توسط باد دانست.

۲-۳ پوزولان‌های مصرفی

در این تحقیق دو نوع پوزولان مورد استفاده قرار گرفتند. در آزمایش‌های سری اول از پوزولان سنگ تراس جاجرود (با سطح مخصوص $9700 \text{ gr} / \text{Cm}^2$) و در آزمایش‌های سری دوم از پوزولان دوده سیلیس (با سطح مخصوص $20000 \text{ gr} / \text{Cm}^2$) استفاده شد. سطح مخصوص پوزولان‌های مصرفی به روش بلین از فرمول زیر محاسبه شد:

$$S = k(\sqrt{n^3} \sqrt{t}) / (1-n) \rho \sqrt{\pi} \quad (1)$$

با توجه به تحقیقات انجام شده در نقاط مختلف دنیا، برای تثبیت این بسترها بیشتر روش‌های فیزیکی و زیست محیطی برای جلوگیری از روان شدن این بسترها بکار می‌رود که در زیر به چند نمونه از آنها اشاره می‌شود [2]. اما هدف از تحقیق انجام شده استفاده از پوزولان برای ایجاد مقاومت جهت ساخت راه و ابنیه فنی در این بسترهاست و در صورت فراهم شدن شرایط مناسب برای واکنشهای پوزولانی در هر محیط (با افزودن پوزولان و آهک)، می‌توان باعث ایجاد روند افزایش مقاومت شد [3].

۱-۲ تجربه کشور هندوستان

هندوستان دارای ۲/۳۴ میلیون کیلومتر مربع بیابان داغ است که به زبان محلی به تار (Thar) موسوم است و دارای ویژگیهایی به شرح ذیل است:

- سرعت زیاد و حرکت تپه‌های ماسه‌ای
- تغییرات زیاد درجه حرارت در طی روز
- تابش شدید آفتاب، تبخیر زیاد و بارندگی بسیار کم

۱-۱-۲ استراتژی‌های بیابان زدایی

این استراتژی‌ها در کشور هند شامل ایجاد ایستگاه‌های تحقیقاتی به منظور:

- تثبیت تپه های ماسه ای متحرک
 - کاشت گیاهان سازگار و مقاوم در برابر اقلیم منطقه
 - احیاء اکولوژیک منطقه و بازسازی زمین‌های ضعیف
 - ورود و کشت گونه های سریع الرشد غیر بومی
 - احیای اکولوژیکی از طریق قرق کردن
 - احیای اکولوژیکی از طریق بذر پاشی هوایی
- است.

۲-۲ تجربه کشور چین

کشور چین در زمینه مقابله با بسترهای فوق دارای تجربیاتی به شرح ذیل است:

- خارج کردن سیلاب ها از مسیر اصلی خود و پمپاژ آن به مناطق ماسه های روان جهت پخش و رسوب کردن گل و لای آن و چسباندن ذرات ریز ماسه به یکدیگر .
- مسطح نمودن تلماسه ها و اصلاح خاک ماسه ای
- ایجاد کمربندهای سبز حفاظتی

۳. مصالح مصرفی

که در آن:

$$S = \text{سطح مخصوص پوزولان بر حسب } \text{Cm}^2 / \text{gr}$$

$$K = \text{ضریب ثابت دستگاه برابر } 20/37$$

$$n = \text{تخلخل پوزولان مورد آزمایش برابر } 0/5$$

$$t = \text{زمان بر حسب ثانیه}$$

$$\rho = \text{وزن مخصوص پوزولان بر حسب } \text{gr} / \text{cm}^3$$

$$\pi = \text{لزجت دینامیکی هوا که برابر با } 0/0001808 \text{ poise است.}$$

لازم به ذکر است هر دو نوع پوزولان، به صورت پودر شده (عبوری از الک نمرة ۲۰۰) مصرف شدند [۲]. جدول زیر نوع و درصد وزنی عناصر موجود در پوزولان‌های مصرفی را نشان می‌دهد.

با توجه به سطح مخصوص و عناصر تشکیل دهنده هر دو نوع پوزولان، انتظار می‌رود دوده سیلیس دارای فعالیت پوزولانی بیشتر در مدت زمان کمتری باشد.

۴-۳-۱ نتایج آزمایش‌های CBR با استفاده از پوزولان

تراس جاجرود

آزمایش‌های CBR طبق استاندارد ASTM D ۱۸۸۳-۸۷ به دو صورت عمل‌آوری شده با رطوبت بهینه و در حالت اشباع با زمان‌های عمل‌آوری مختلف انجام شده است [۶]. تراکم نمونه‌ها با رطوبت بهینه و به روش آشتوی اصلاح شده انجام گردیده است. همچنین میزان آهک مصرفی در نمونه‌ها مقدار بهینه بوده است. نمونه‌های CBR تر پس از طی زمان عمل‌آوری جهت اشباع شدن به مدت ۴ روز تحت سربار ۵/۸ کیلوگرم، زیرآب قرار گرفته و در این مدت میزان تورم آنها بررسی شد. با توجه به دانه‌ای بودن خاک‌های مصرفی و عدم قابلیت تورم آنها مقدار تورم ناچیز بوده و مدنظر قرار نگرفته است. نتایج به دست آمده به صورت رابطه بین درصد CBR و درصد پوزولان مصرفی در زمان‌های عمل‌آوری مختلف در دو حالت رطوبت بهینه و اشباع در شکل‌های ۲ تا ۵ آمده است.

۴-۲ آزمایش‌های تراکم

این آزمایش‌ها برای تعیین میزان بهینه رطوبت جهت دستیابی به حداکثر وزن مخصوص خشک خاک با توجه به درصد بهینه آهک (تعیین شده در بخش ۲-۱) و درصدهای مختلف پوزولان (۳٪، ۷٪، ۱۱٪ و ۱۵٪ وزنی خاک) به روش پروکتور اصلاح شده طبق استاندارد ASTM D ۱۵۵۷-۸۷ انجام شد [۵]. دامنه تغییرات رطوبت بهینه برای درصدهای مختلف پوزولان برای خاک نوع G بین ۶/۷٪ تا ۷٪ و برای خاک نوع K بین ۵/۵٪ تا ۶/۷٪ بود که در هنگام نمونه‌گیری با درصدهای مختلف پوزولان، میزان بهینه رطوبت در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۲ نتایج آزمایش‌های CBR با استفاده از پوزولان

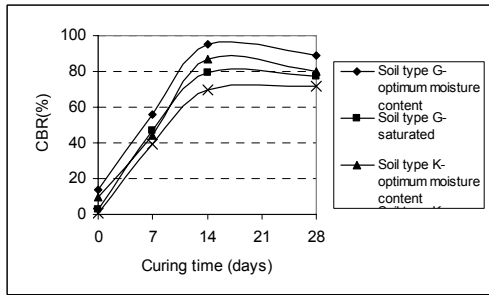
دوده سیلیس

جهت بررسی تاثیر استفاده از پوزولانی با درصد سیلیس و آلومین متفاوت نسبت به پوزولان تراس جاجرود، پوزولان دوده سیلیس انتخاب شد. همان‌طور که از نتایج آنالیز XRF مشخص است (جدول ۱)، این پوزولان دارای سیلیس زیاد و آلومین ناچیز است. این آزمایش‌ها طبق استاندارد ASTM D ۱۸۸۳-۸۷ با درصد رطوبت و آهک بهینه، زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۴ و ۲۸ روزه، در شرایط رطوبتی تر و خشک و درصد پوزولان دوده سیلیس مصرفی ۳٪ و ۷٪ انجام شدند [۸]. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۶ و ۷ آمده است.

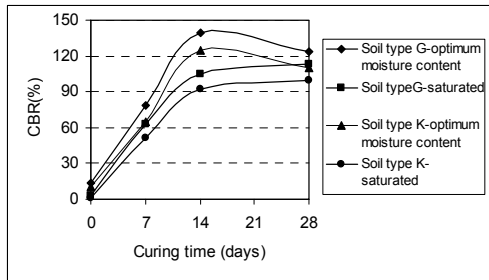
۴-۳ آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

جدول ۱. نتایج تحلیل XRF انجام شده بر روی پوزولان تراس جاجرود و دوده سیلیس مصرف شده

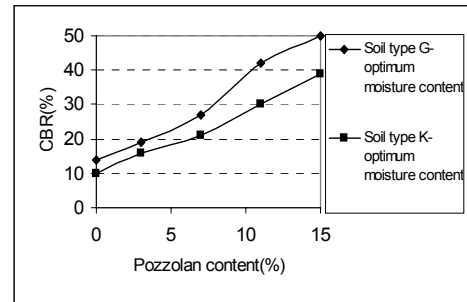
K_2O	So_3	P_2O_5	SiO_2	Al_2O_3	M_gO	Na_2O	LOI	(%)
۰/۰۴	-	-	۹۸	۰/۳	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۰۳۵	پوزولان دوده سیلیس
۲/۹۴۲	۰/۰۹۸	۰/۰۵۶	۶۵/۱۲۹	۱۰/۹۵۹	۱/۴۶۲	۰/۰۱۵	۱۰/۹۵	پوزولان تراس جاجرود
Zr	Sr	Zn	Cl	MnO	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	(%)
-	-	-	-	-	-	۰/۲۵	۰/۱۲	پوزولان دوده سیلیس
-	۰/۱۱۸	-	-	۰/۱۹۹	۰/۳۰۲	۲/۳۴۵	۵/۴۱۲	پوزولان تراس جاجرود



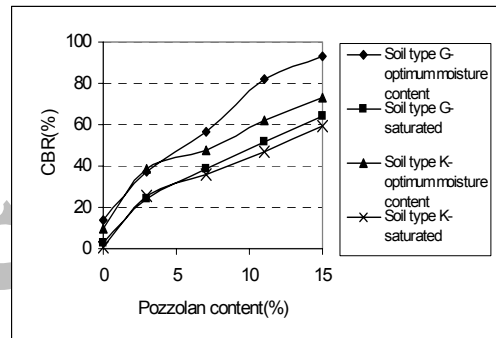
شکل ۱. رابطه بین نسبت باربری کالیفرنیا و زمان عمل آوری (۳٪ پوزولان مصرفی)



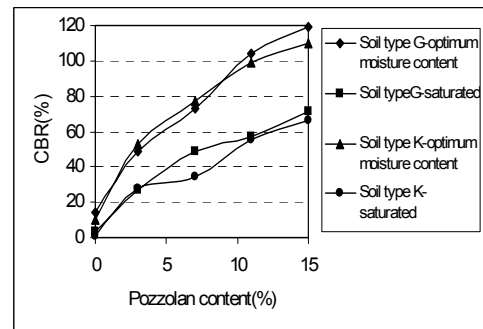
نمودار ۲. رابطه بین نسبت باربری کالیفرنیا و زمان عمل آوری (۷٪ پوزولان مصرفی)



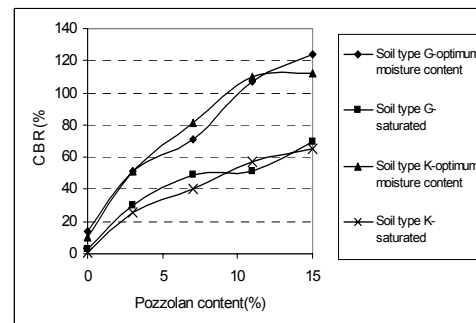
شکل ۲. رابطه بین درصد پوزولان مصرفی و نسبت باربری کالیفرنیا (۷روزه)



نمودار ۳. رابطه بین درصد پوزولان مصرفی و نسبت باربری کالیفرنیا (۱۴روزه)



نمودار ۴. رابطه بین درصد پوزولان مصرفی و نسبت باربری کالیفرنیا (۲۸روزه)



نمودار ۵. رابطه بین درصد پوزولان مصرفی و نسبت باربری کالیفرنیا (۶۰روزه)

۴-۴ آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری

۴-۴-۱ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری با

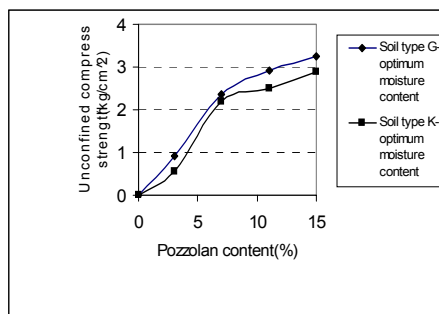
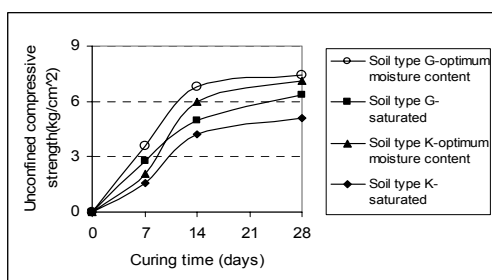
استفاده از پوزولان تراس جاجرود

این آزمایش‌ها با نمونه‌هایی به قطر ۵ و طول ۱۰ سانتی‌متر (نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۲) طبق استاندارد ASTM D ۲۱۶۶-۸۷ با درصدهای آهک و رطوبت بهینه و همچنین درصدهای پوزولان (تراس جاجرود) ۳٪، ۷٪، ۱۱٪ و ۱۵٪ وزنی خاک برای هر دو نوع خاک K و G با زمان‌های عمل آوری مختلف انجام شدند [7].

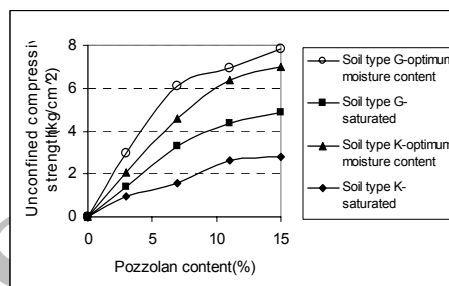
نتایج به دست آمده به صورت نمودارهای مقاومت فشاری تک محوری (بر حسب Kg/cm^2) در برابر درصد پوزولان مصرفی در شکل‌های ۸ تا ۱۱ آمده است.

لازم به ذکر است که جهت اشیاع شدن، نمونه‌ها به مدت ۴ روز در زیر آب در دمای آزمایشگاه نگهداری شده‌اند.

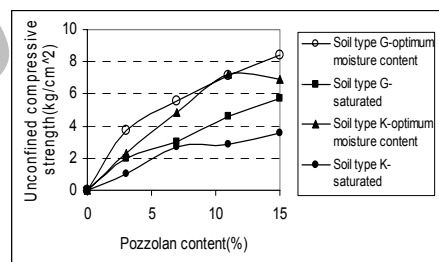
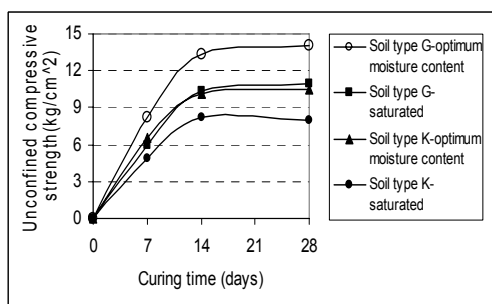
پوزولان دوده سیلیس انتخاب شد. این آزمایشها طبق استاندارد ASTM D ۲۱۶۶-۸۷ با درصد رطوبت و آهک بهینه نمونه‌گیری و طی زمانهای ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفت [7]. لازم به ذکر است درصد پوزولان مصرفی در این نمونه‌ها ۳٪ و ۷٪ وزنی خاک بوده و نمونه‌ها پس از عمل‌آوری به صورت خشک و اشباع شده در آب به مدت ۴ روز، تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده می‌شوند.



شکل ۸. رابطه بین درصد پوزولان مصرفی و مقاومت فشاری تک محوری (۷ روزه)

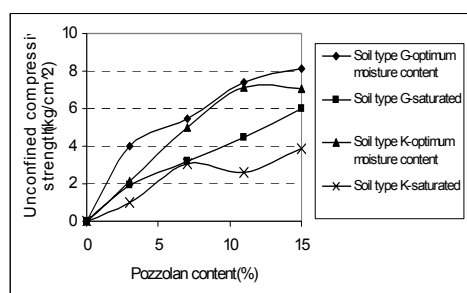
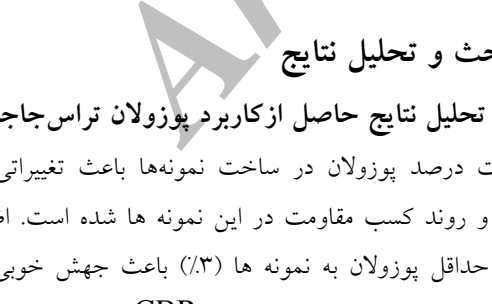


شکل ۹. رابطه بین درصد پوزولان مصرفی و مقاومت فشاری تک محوری (۱۴ روزه)



شکل ۱۰. رابطه بین درصد پوزولان مصرفی و مقاومت فشاری تک محوری (۲۸ روزه)

شکل ۱۳. رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و زمان عمل‌آوری (۷٪ پوزولان مصرفی)



شکل ۱۱. رابطه بین درصد پوزولان مصرفی و مقاومت فشاری تک محوری (۶۰ روزه)

۵. بحث و تحلیل نتایج

۱-۵ تحلیل نتایج حاصل از کاربرد پوزولان تراس جاجرود تغییرات درصد پوزولان در ساخت نمونه‌ها باعث تغییراتی در مقدار و روند کسب مقاومت در این نمونه‌ها شده است. اضافه کردن حداقل پوزولان به نمونه‌ها (۳٪) باعث جهش خوبی در مقاومت نمونه‌ها شده است. مقدار CBR برای ۳٪ پوزولان مصرفی در حالت رطوبت بهینه، با زمان عمل‌آوری ۷ روزه رشد متوسطی داشته و با افزایش زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز رشد درصد CBR نسبت به حالت طبیعی روند صعودی سریع‌تری پیدا کرده است. این در حالی است که با افزایش درصد پوزولان مصرفی از

۲-۴-۲ نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری تک محوری با استفاده از پوزولان دوده سیلیس

در این مرحله نیز جهت بررسی تاثیر استفاده از پوزولانی با درصد سیلیس و آلومین متفاوت نسبت به پوزولان تراس جاجرود،

نظر حداکثر ۱۴ روز است و بعد از آن بر مقاومت نمونه‌ها افزوده نمی‌شود.

نکته مورد توجه دیگر ایجاد مقاومت بیشتر با درصد‌های کمتر توسط پوزولان دوده سیلیس در خاکهای مورد نظر است. لازم به ذکر است که با درصد پوزولان دوده سیلیس ۳٪، مقاومتی در حدود مقاومت نمونه‌های با پوزولان تراس جاجرود با درصد وزنی ۷٪ ایجاد شده است. همچنین با مصرف دوده سیلیس ۷٪ مقاومت ایجاد شده تقریباً در حد مقاومت پوزولان تراس جاجرود با درصد‌های ۱۱٪ و ۱۵٪ بوده است. این مطلب بیانگر فعالیت پوزولانی زیاد دوده سیلیس است که با توجه به تحلیل‌های XRD انجام گرفته قابل پیش بینی بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با مصرف پوزولانی دارای درصد زیاد سیلیس به صورت آمورف می‌توان رده مقاومتی بیشتری در زمان کمتر نسبت به پوزولان‌های معمولی (تراس جاجرود) ایجاد کرد [8].

همچنین مقاومت زیاد نمونه‌های آزمایشی در شرایط اشباع، حاکی از سختی و پایداری ترکیبات ایجاد شده است. مقاومت اشباع نمونه‌ها نسبت به حالت خشک حدود ۷۰٪ تا ۷۵٪ است.

۶. نتیجه گیری

۱- ایجاد زمینه لازم جهت بررسی تاثیر میزان سیلیس و آلومین فعال بر روند تثبیت خاکهای مورد نظر با توجه به نوع پوزولانهای مصرفی:

با توجه به استفاده از دو نوع پوزولان با درصد‌های مختلف سیلیس و آلومین در تثبیت این خاکها می‌توان تاثیر این عناصر را بر خاکهای آزمایشی از لحاظ مقدار نهایی مقاومت ایجاد شده و چگونگی روند ایجاد مقاومت در طول دوره‌های عمل آوری مختلف بررسی کرد.

۲- بررسی تاثیر میزان سیلیس موجود در پوزولان‌ها بر مقدار مقاومت نهایی ایجاد شده در این نوع خاکها:

با توجه به نمودارهای حاصل از نتایج آزمایش‌ها (انجام شده بر روی هر دو نوع خاک مصرفی)، پوزولان دوده سیلیس که دارای درصد بیشتری سیلیس فعال نسبت به پوزولان تراس جاجرود است، با درصد‌های وزنی یکسان، مقاومت بیشتر اما در زمان کمتری را در این نوع خاکها ایجاد کرده است.

۳- بررسی تاثیر میزان آلومین موجود در پوزولانها بر مقدار مقاومت در زمانهای عمل آوری مختلف:

۳٪ به ۷٪ و ۱۱٪ روند رشد درصد CBR همچنان ادامه پیدا کرده است. در حالی که با تغییر درصد پوزولان از ۱۱٪ به ۱۵٪ روند رشد درصد CBR کندتر شده است. همچنین با تغییر زمان عمل آوری از ۲۸ روز به ۶۰ روز، رشد درصد CBR در درصد‌های مختلف پوزولان مصرفی (مخصوصاً بعد از ۳٪ تا ۱۵٪) کندتر شده است. برای حالت اشباع (عمل آوری شده با رطوبت بهینه و اشباع شده در آب به مدت ۴ روز) روند رشد درصد CBR نسبت به حالت طبیعی سریع‌تر بوده است، زیرا مقاومت های

به دست آمده در حالت اشباع و بدون مصرف پوزولان برای خاک نوع K برابر با ۱٪ و برای خاک نوع G برابر با ۳٪ بوده و بعد از مصرف درصد‌های مختلف پوزولان رشد چشمگیری داشته است [9].

با افزایش درصد پوزولان مصرفی مقاومت فشاری تک محوری نیز رشد صعودی داشته است. این در حالی است که این روند صعودی، بعد از مصرف ۷٪ پوزولان به مراتب کندتر شده است.

روند کسب مقاومت فشاری تک محوری نسبت به مقاومت CBR نمونه‌ها، از نظر مهندسی حائز اهمیت بیشتری است و

توجیه آن این است که خاکهای مصرفی در ابتدا هیچ گونه مقاومتی نداشته و به علت دانه‌ای بودن و عدم چسبندگی بین ذرات، این نوع خاکها دارای مقاومت فشاری تک محوری صفر هستند و ایجاد مقاومت فشاری در این نوع خاکها بیانگر این مطلب است که واکنش‌های پوزولانی مربوطه به خوبی انجام شده و روند کسب مقاومت، موفقیت آمیز بوده است [8].

با توجه به نکات ذکر شده، پوزولان تراس جاجرود که دارای ۶۵٪ سیلیس و حدود ۱۱٪ آلومین است، مقاومت‌های مناسبی را در زمان‌های عمل آوری متوسط (تا ۲۸ روزه) ایجاد کرده است.

۲-۵ تحلیل نتایج حاصل از کاربرد پوزولان دوده سیلیس

روند ایجاد مقاومت در نمونه‌های مورد نظر تا ۷ روز اول عمل آوری رشد صعودی خوبی داشته در حالی که این روند رشد بعد از ۷ روز و تا زمان رسیدن به ۱۴ روز، کاهش یافته اما همچنان بر مقاومت نمونه‌ها اضافه شده است.

بنابراین نقطه عطف این منحنی‌ها در زمان عمل آوری بین ۱۱ تا ۱۳ روز اتفاق افتاده است. بعد از ۱۴ روز تا زمان رسیدن به ۲۸ روز این روند کاملاً ثابت مانده و متوقف شده است. بنابراین زمان فعالیت پوزولانی این پوزولان (دوده سیلیس) در خاکهای مورد

4. ASTM D 4972 (1993) "Standard test method for pH of soils", American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Vol. 4.08.
5. ASTM D 1557 (1993) "Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ [27,000 kN-m/m³])", American Society for Testing Materials, Philadelphia, Vol. 4.08, pp. 227-234.
6. ASTM D 1883 (1993) "Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory compaction soils", American Society for Testing Materials, Philadelphia, Vol. 4.08.
7. ASTM D 2166 (1993) "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils", American Society for Testing Materials, Philadelphia, Vol. 4.08.
8. Tensor, Sub grade Improvement: Construction Over Soft Soils , Tensar Earth Tecnologies Inc., WWW.TENSARCORP.com, 2000.
9. Tensar Technical Note BR10 (1998): "Chemical and mechanical stabilization of subgrades and flexible pavement sections", Tensar Earth Technologies Inc., In WWW.TENSARCORP.com.
10. Abrol, IP. and Venkatesvarlu, J. (1995) "Sustainable development of arid areas in India with particular reference to western Rajesthan", In "Land Degradation and Desertification in Asia and the Pacific Region (Eds., A.K. Sen and Amal Kar)", Scientific Publishers, Jodhpur, pp.135-153

چنان که از نتایج این آزمایش‌ها مشخص است میزان آلومین قابل مشارکت در واکنش‌های پوزولانی درمقدار مقاومت نهایی و به خصوص در زمان عمل آوری (مربوط به فعالیت پوزولانی ثانویه) تاثیر بسزایی دارد. به عنوان مثال تراس جاجرود نسبت به دوده سیلیس با درصد وزنی یکسان، مقاومت کمتری در زمان عمل آوری بیشتر در این نوع خاکها ایجاد کرده است.

۴- بررسی تاثیر میزان سیلیس و آلومین موجود در پوزولانها بر زمان عمل آوری مفید در این نوع خاکها:

با توجه به نتایج آزمایش‌ها، زمان عمل آوری مفید برای تثبیت این نوع خاکها (زمانی که بعد از آن مقدار مقاومت تغییر چندانی ندارد)، در حالت استفاده از پوزولان تراس جاجرود ۲۸ روز و برای پوزولان دوده سیلیس ۱۴ روز است.

۵- بررسی تاثیر میزان سیلیس و آلومین موجود در پوزولانها بر مقدار و روند افزایش مقاومت در حالت اشباع در این نوع خاکها:

مقاومت نسبتا زیاد نمونه‌های آزمایشی در شرایط اشباع، نشانگر سختی و پایداری خوب ترکیبات ایجاد شده است. لازم به ذکر است که مقاومت اشباع نمونه‌ها نسبت به حالت خشک حدود ۷۰٪ تا ۷۵٪ است.

۶- در نهایت با جمع بندی مطالب فوق می‌توان برای پوزولان تراس جاجرود، فعالیت پوزولانی کمتر و زمان بیشتر جهت انجام واکنش‌های مربوطه، و همچنین برای پوزولان میکروسیلیس فعالیت پوزولانی بیشتر در زمان کمتر را بیان نمود.

۷. مراجع

۱. صالحی، محسن، "تثبیت بستر ماسه روان با استفاده از پوزولان در مجاورت آهک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.
2. Massaza, F. and Costa, U. (1977) "Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cement" Report presented at the Informal Seminar on Cement Chemistry Organized by C.A.CA In Wexham Spring U.K.
3. ASTM D 421 (1993) "Standard practice for dry preparation of soil sample for particle size analysis and determination of soil contents", American Society for Testing Materials, Philadelphia, Vol. 4.08.

Archive of SID

Technical Effects of Air Cooled Blast Furnace Slag on Asphalt Mixtures

A. Esmaeili Kalalagh, Ministry of Roads and Transportation, Tehran, Iran.

S.M. Marandi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.

P. Safapour, Lecturer, Department of Computer Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.

E-mail: marandi@mail.uk.ac.ir

Abstract

Air cooled blast furnace slag is a by product made of gradually air cooled molten blast furnace slag and is often stored in stockpiles near the iron mills and usually occupy a wide area around the iron mills. From this perspective the further use of these materials can have its own merits. Air cooled blast furnace slag can be used in asphalt mixtures because of their proper frictional properties. This research is conducted to investigate the effect of air cooled blast furnace slag on technical characteristics of asphalt mixtures and compare the results with the traditional asphalt mixtures. Two series of Marshal and Texas Boiling Tests were carried out in the laboratory. Three types of aggregates (air cooled blast furnace slag, siliceous gravel, lime gravel) with two types of dense graded and open graded were used. The frictional properties of the asphalt mixed with air cooled blast furnace slag materials were evaluated by using the British Pendulum, and the Sand Patch Method. Resistance to moisture was also determined in accordance to Texas Boiling Test. Results showed that by increasing percentage of air cooled blast furnace slag in asphalt mixtures, Marshall Stability, flexibility and skid resistance augmented. Also Texas Boiling Tests indicated that asphalt mixtures have a good resistance to stripping.

Keywords: Slag, air cooled blast furnace slag, asphalt mixtures, skid resistance

1. Introduction

Usage of industrial by-products and wastes is important from different points of view. It helps saving and sustaining the natural resources that are not replenished. It will reduce the pollution of the ecological surroundings. Also it helps saving and recycling the spent energies in production process. Air cooled blast furnace slag materials can be used as fine or coarse aggregates in asphalt mixtures. In spite of plentiful existence of this type of material, the mere problem with using this type of material is still the limiting distance from the storage deposits which is usually about 50 to 100 Km. [1]. Air cooled blast furnace slag has premium physical and mechanical properties. The main advantages of asphalt mixtures containing air cooled blast furnace slag materials are as follows:

- a) The pH of air cooled blast furnace slag is between 8 to 10 and because of this high pH, it has good binding property when used with bituminous materials [1]. The chemical reaction of acidic bitumen and alkali aggregate will cause the mixture to be impermeable to humidity and contribute a high resistance to stripping [2].
- b) The crushed and angular appearance and surface roughness of the air cooled blast furnace slag aggregates cause rutting resistance which is also advantageous for highways, industrial roads and parking areas subjected to heavy axial loads [3].
- c) According to BS812, Part 3, the air cooled blast furnace slag aggregate has a high polished stone value (PSV) [4]. Therefore, the asphalt mixtures containing air cooled blast furnace slag

has a high skid resistance. Most of aggregates used in asphalt mixtures show a good skid resistance at the beginning of the pavement services. However, heavy traffic makes them abrasive and causes lose their skid resistance. Marek reported that 50% of the initial skid resistance is lost during the first two years of pavement services and mentioned that the unique important factor that affects reduction of skid resistance is the polishing characteristics of aggregates used in the asphalt mix [5]. Therefore, usage of aggregates with high skid resistance and durability is vital for road safety.

2. The Laboratory Research Program

For evaluation of physical and mechanical characteristics of air cooled blast furnace slag and comparing the results with siliceous and lime gravels, several tests including specific gravity, shape, resistance to aggregate impact value, resistance to aggregate crushing value, Los Angeles abrasion and friction were conducted. To evaluate the asphalt mixtures characteristics containing air cooled blast furnace slag, Marshall specimens were made in accordance to ASTM D3515 and ASTM D1559 standards in two forms of open graded and dense graded with nominal maximum particle size of 12.7 mm [6]. For evaluation of resistance to stripping for similar mixtures, Texas Boiling Tests were performed in accordance to ASTM D3625. To compare frictional characteristics of the asphalt mixtures consisting of macro and micro textures, English Pendulum Method tests were carried out for micro textures in accordance to ASTM E303-93 and ASTM E965-87 for macro textures.

2.1 Types of Materials

2.1.1 Aggregate

Three types of aggregates have been used to carry out a series of tests. The first type was the air cooled blast furnace slag and the other two were siliceous and lime gravel aggregates. Air cooled blast furnace slag was obtained from Iron Mill Factory situated in Isfahan, central part of Iran. Due to lack of fine materials in air cooled blast furnace slag, Portland cement type II is used for asphalt mixture. The gradation of the test specimens were analyzed in accordance to ASTM D3515 standard and were open and dense graded. The results of sieve analysis of materials

for making asphalt mixtures are given in Tables 1 and 2.

2.1.2 Bitumen

The bitumen used in this research was pure bitumen with penetration degrees of 60 to 70 and was obtained from Tehran refinery. The specifications of the pure bitumen used in this study are shown in Table 3.

3. Laboratory Tests Performed on Aggregates

To compare the specifications of air cooled blast furnace slag with siliceous and lime aggregates, laboratory tests including specific gravity, shape and resistance tests were performed on samples. The results of tests performed on three types of aggregates are shown in Tables 4 through 6. The results show that, the air cooled blast furnace slag has often cubic shape and a larger specific gravity compared to siliceous and lime aggregates. Meanwhile, the results indicate that the resistance of air cooled blast furnace slag is lower than siliceous aggregate and higher than lime.

4. Marshall Specimens

In order to find optimum bitumen for gradation specified in Tables 1 and 2, Marshall specimens were made and tested according to ASTM D1559 [6]. Aggregates and bitumen were heated at temperatures of 140 and 180 °C respectively and then were compacted with 75 blows of Marshall Hammer on each side. The bulk specific gravity of the specimens was measured according to ASTM D2726-88. The specimens were kept at ambient temperature for one day. To carry out the Marshall stability tests, the samples were kept in water bath at 60 °C for 30 minutes. Apparent specific gravity of the samples was measured according to ASTM D2041-90 and then the air voids were computed. The results of Marshall test specimens showed that they are satisfied by the design criteria of MS-2 publication of specifications [7]. The optimum bitumen content was determined according to the Marshall stability, percentage of void spaces of compacted specimens, specific gravity and Void Field Asphalt (VFA). The results of optimum bitumen content for different aggregates are shown in Tables 1 and 2.

Technical Effects of Air Cooled Blast Furnace Slag on Asphalt Mixtures

Table 1 Dense Graded Aggregate Used for Asphalt Mixtures

Sieve Size	Percent passing							Allowable Limit ASTM D3515
	Air Cooled Blast Furnace Slag (A)	Siliceous Sand (S)	No.1 0.7A+0.3S	No.2 0.6A+0.4S	No.3 0.5A+0.5S	No.4 0.4A+0.6S	No.5 Natural Aggregate	
¾"	100	100	100	100	100	100	100	100
½"	95	100	96.5	97	97.5	98	95	90-100
⅜"	85	100	89.5	91	92.5	94	85	-
No.4	44	95	59.3	64.4	69.5	74.6	59	44-74
No.8	6	85	29.7	37.6	45.5	53.4	43	28-58
No.16	6	70	25.2	31.6	38	44.4	27	-
No.30	6	50	19.2	23.6	28	32.4	13	-
No.50	6	11	7.5	8	8.5	9	13	5-21
No.100	6	1	4.5	4	3.5	3	8	-
Mineral filler	6	0	4.2	3.6	3	2.4	5	2-10
Percentage of optimum bitumen			6.2	6	5.8	5.9	5.6	-

Table 2 Open Graded Aggregates Used for Asphalt Mixtures

Sieve size	Percent passing					Allowable Limit ASTM D3515 for Open Graded
	Air Cooled Blast Furnace Slag (A)	Siliceous Sand (S)	No.6 100% A	No.7 0.85A+0.15S	No.8 Natural Aggregate	
¾"	100	100	100	100	100	100
½"	90	100	90	91.5	85	85-100
⅜"	65	100	65	70	60	60-90
No.4	20	90.5	20	30.5	20	20-50
No.8	5	47.5	5	10.5	5	5-25
No.16	4	47.5	4	10	3	3-19
No.30	4	7.5	4	4.5	3	-
No.50	4	7.5	4	4.5	3	0-10
No.100	4	7.5	4	4.5	3	-
Mineral filler	4	7.5	4	4.5	3	-
Percentage of Optimum bitumen			5.4	5.7	5.9	-

Table 3 Bitumen Specifications used in Asphalt Mixtures

Bitumen Specification	Standard Used	Amount
Specific Gravity	ASTM D70	0.98
Degree of Penetration (x 0.1 mm.)	ASTM D5	64
Softening Point, (°C)	ASTM D36	50
Ductility (cm.)	ASTM D113	>100

Table 4 Specifications of Specific Gravity and Absorption of Water by Aggregates Retained on Sieve No. 8

Types of Aggregate	Standard Used	Bulk Specific Gravity	Water Absorption (%)
Air Cooled Blast Furnace Slag	ASTM C127-77	2.78	3.1
Siliceous Gravel		2.44	3.3
Lime Gravel		2.28	3.9

Table 5 Shape Characteristics of Aggregates

Types of Aggregate	Standard Used	Percentage of Lamination For 9.5 mm Grains (%)	Percentage of Elongation For 9.5 mm Grains (%)	Maximum Limit (%)
Air Cooled Blast Furnace Slag	BS812-part 1	8.1	3.7	25
Siliceous Gravel		21.4	18.9	
Lime Gravel		22.7	20.8	

Table 6 Resistance Characteristics of Aggregates

Types of Aggregates	Aggregate Characteristics	Standard Used	Result	Maximum Limit (%)
Air Cooled Blast Furnace Slag	Aggregate Impact Value (AIV) %	BS812-Part 112	18.6	30
Siliceous Gravel			14.5	
Lime Gravel			23.8	
Air Cooled Blast Furnace Slag	Aggregate Crushing Value (ACV) %	BS812-Part 110	21	25
Siliceous Gravel			15.5	
Lime Gravel			27	
Air Cooled Blast Furnace Slag	Los Angeles Abrasion %	ASTM C131-76	27	40 to 45 According to AI Standard
Siliceous Gravel			19	
Lime Gravel			27	

4.1 Analysis of Marshall Test Results

4.1.1 Dense Graded Materials

In this series of tests, five Marshall Samples with different percentage of air cooled blast furnace slag and siliceous sands were made. The Marshall test results showed that by increasing the percentage of air cooled blast furnace slag, the Marshall stability and specific gravity will increase. This is shown in figures 1 and 2. Meanwhile, the Figure 2 shows that the Marshall stability of asphalt mixtures containing air cooled blast furnace slag has higher values, compared to the asphalt mixtures containing siliceous aggregates.

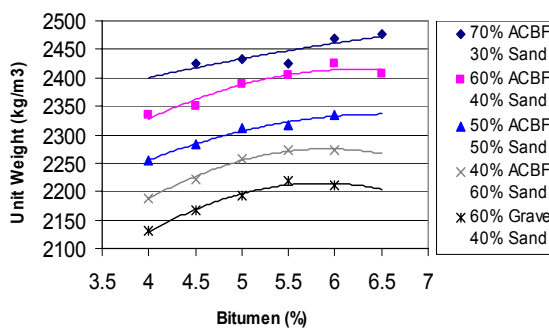


Figure 1 Specific Gravity for Five Types of Asphalt Mixtures

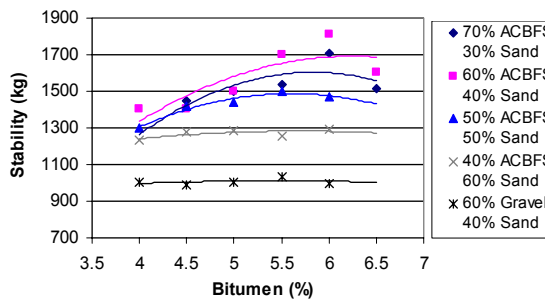


Figure 2 Marshall Stability for Five Types of Asphalt Mixtures

Figure 3 shows that the percentage of voids in mineral aggregates (VMA) is reduced by air cooled blast furnace slag. The reason is due to the existence of lower lamination and elongation increased of the air cooled blast furnace slag. The minimum voids of mineral aggregates recommended by Asphalt Institute are 14 percent for gradation of nominal maximum particle size of 12.7 mm. The results show that the VMA of asphalt mixtures made with air cooled blast furnace slag is above the limit value given by the Asphalt Institute.

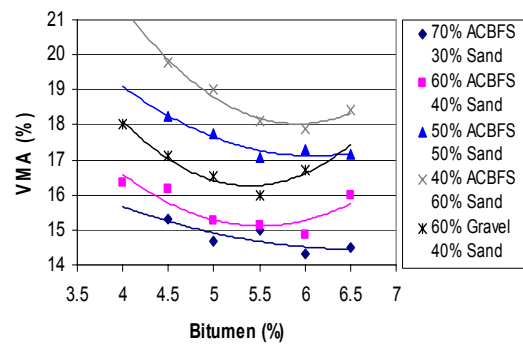


Figure 3 the Voids in Mineral Aggregates for Five Types of Asphalt Mixtures

Figure 4 indicates that with increase of air cooled blast furnace slag, the asphalt flow and its flexibility increases. The changes in the configuration of the curves also show that the asphalt mixtures with air cooled blast furnace slag are in the range limited by the Asphalt Institute.

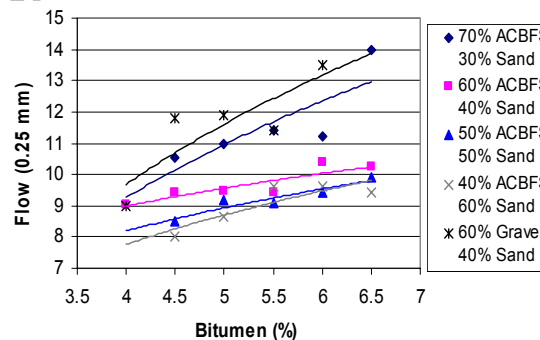


Figure 4 Flow Curves for Five Types of the Asphalt Mixtures

4.1.2 Open Graded Materials

At this stage three series of Marshall Specimens with different percentage of air cooled blast furnace slag were tested. The sieves analyses of these samples are denoted by No.6, No.7 and No. 8 and are given in Table 2. The results shown in Figure 5 indicate that, the stability of the porous asphalt mixtures containing air cooled blast furnace slag has higher values than the asphalt mixtures containing natural aggregates. This is the benefit of the porous asphalt while, the greatest weakness of the porous asphalt mixtures are their low stability.

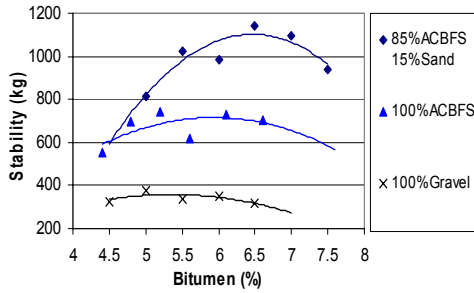


Figure 5 Marshall Stability of Three Types of Porous Asphalt Mixtures

5. Resistance to Deterioration

To investigate the resistance of asphalt mixtures to moisture, the Texas Boiling Tests were used according to ASTM D3625 [6]. In these series of tests, six types of asphalt mixtures were made. These series included two test samples with siliceous aggregates, two with air cooled blast furnace slag and two with lime aggregates. The bitumen used in these samples was pure bitumen with penetration grade of 60-70. To recognize the stripping of the material easily, the grains larger than 2.36 mm (sieve No. 8) were used. After mixing the aggregates with bitumen at average temperature of 160 C° and cooling them at ambient temperature, the mixture was inserted in boiling water for ten minutes. Then, the samples were left at room temperature for one day and then with counting the stripped grains, the percentage of stripped materials was calculated. The test results are shown in Figure 6.

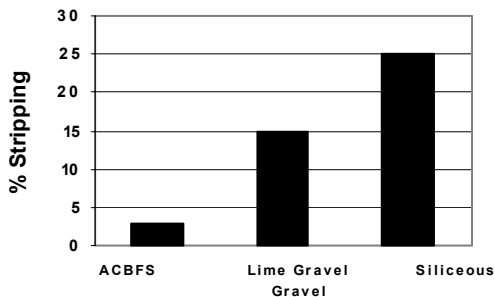


Figure 6 Results of Texas Boiling Tests

Figure 6 shows that asphalt mixtures containing air cooled blast furnace slag have a good performance against stripping. Furthermore, after curing, the air cooled blast furnace slag can be used in the porous asphalt mixtures in the rainy areas or places with high humidity

6. Skid Resistance

To evaluate the skid resistance of asphalt mixtures made with air cooled blast furnace slag, two types of dense graded and open graded mixtures with different percentages of air cooled blast furnace slag and natural aggregates (description shown in Tables 1 and 2) were made. The size of the made samples were 50×100×150 mm. In these series of tests the skid resistance characteristics of the two different types of textures (micro and macro) were investigated. To evaluate the micro texture in wet condition, the English Pendulum Method was used according to ASTM E303-93 and the BPN numbers for each test were calculated. Figures 7 and 8 show the result of English Pendulum Tests for different sample gradation mixtures. According to Road Publication Note 27, the allowable limited BPN for three groups of roads are given in Table 8. The durability of the micro texture against traffic is measured according to PSV indicator. For evaluation of the macro texture and according to ASTM E965-96, the sand patch method was used and texture depth for each sample was determined. Figures 9 and 10 show the results of the sand patch tests. Also the durability of macro texture against traffic was analyzed according to the aggregate abrasion value (AAV).

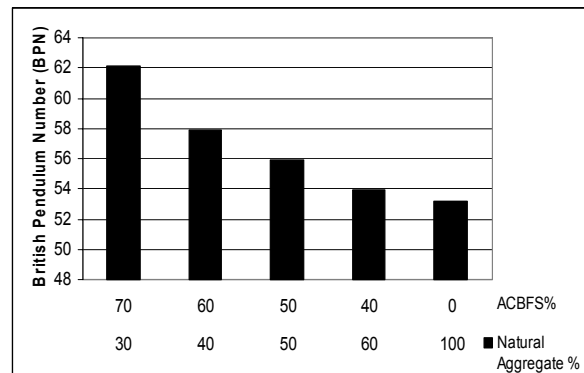


Figure7 BPN Figures for Dense Graded Samples

Technical Effects of Air Cooled Blast Furnace Slag on Asphalt Mixtures

Figures 7 and 8 show that skid resistance has direct correlation with the amount of air cooled blast furnace slag. Comparing BPN number of the open graded asphalt containing air cooled blast furnace slag with the allowable limit is given in Table 7. It is clear that at least 50% of the air cooled blast furnace slag in asphalt mixtures can be used for heavy traffic roads.

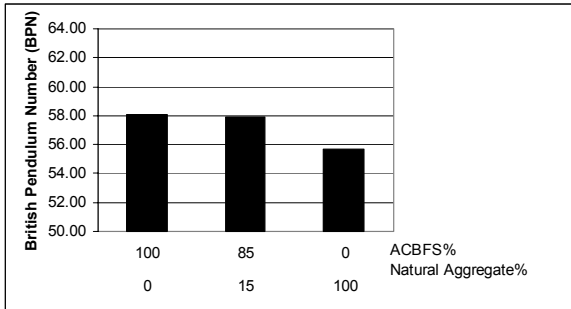


Figure 8 BPN Figures for Open Graded Samples

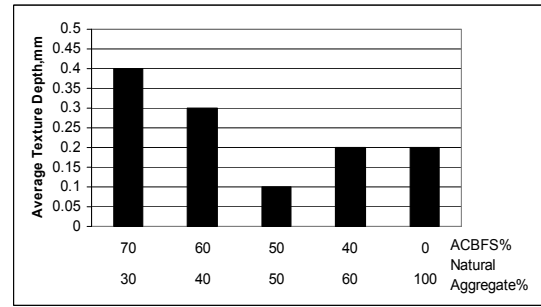


Figure 9 Depth of Texture for Dense Graded Samples

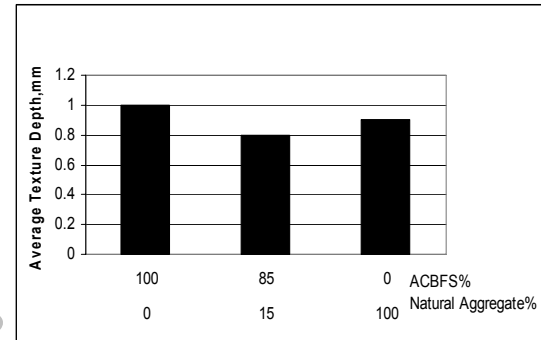


Figure 10 Depth of Texture for Open Graded Sample

Table 7 Minimum BPN for Wet Conditions [8]

Category	Site Situation	Minimum skid resistance (wet surface)
A	Difficult sites such as: 1. Roundabouts 2. Bends with Radius less than 150m. on unrestricted roads. 3. Gradients Greater than 1 to 20 or lengths greater than 100m. 4. Approaches to Traffic Lights on Unrestricted Roads	65
B	Motorways, Trunks and Class 1 Roads and Heavily Trafficked Roads in Urban Areas (Carrying more than 2000 Vehicles Per Day)	55
C	All other Sites	45

7. Summary

Based on large production of air cooled blast furnace slag in iron and steel foundries, and due to good physical properties and skid resistance of these types of materials, special attention have been paid to the using of air cooled blast furnace slag in asphalt mixtures in recent years.

Using air cooled blast furnace slag in asphalt mixtures contribute both skid and stripping resistance. These two properties are very important for asphalt mixtures and few aggregates are able to have these two properties together.

Stripping phenomena appears more often in porous asphalt mixtures. So using air cooled blast furnace slag aggregates will improve stripping and revealing the failure of the porous asphalt mixtures.

The Marshall Laboratory Tests showed that, Marshall Stability is higher when air cooled blast furnace slag is used in asphalt mixtures. Since the porous asphalt mixtures have low Marshall Stability, therefore using air cooled blast furnace slag aggregates will improve Marshall Stability.

8. Conclusions

The research carried out concluded to the following results:

1. The results of Marshall Tests showed that by increasing the percentage of the air cooled blast furnace slag aggregates, the Marshall Stability increases in asphalt mixtures and compared to other aggregates used in asphalt mixtures has more stability.
2. Test results of Texas Boiling for asphalt mixtures containing air cooled blast furnace slag showed higher resistance to stripping.
3. Test results for skidding showed that, the skid resistance increases by increased air cooled blast furnace slag.
4. Using the air cooled blast furnace slag in porous asphalt contributes in higher Marshall Stability, compared to the natural aggregate asphalt, mixtures (Figure 2).

9. References

1. Liz Hunt, P.E, Boyle, Glenn E. (2000) "Steel slag in hot mix asphalt concrete, Final Report", Oregon Department of Transportation.
2. Fwa, T.F., and Ang, T.S. (1993) "Effects of moisture on properties of asphalt mixes in wet tropical climate; A laboratory study", Transportation Research Record 1417, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
3. Lee, A.R. (1974) "Blast furnace and steel slag: production, properties and uses", Edward Arnold.
4. British Standards Institution (1985) "Testing aggregates", BS 812, British Standards Institution.
5. Marek, C.R. (1972) "Review, selection and calibration of accelerated wear and skid resistance testing equipment", Illinois Cooperative Highway Research Program, University of Illinois at Urbana-Champaign, Interim Report – Phase 1, Project IHR-406.
6. American Society for Testing and Materials (1998) "Road and paving materials, pavement management technologies", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4.03, American Society for Testing and Materials.
7. Asphalt Institute (1969) "Mix design methods for asphalt concrete", Manual Series No.2 (MS-2), Sixth Edition.
8. TRRL (1969) "Instructions for using the portable skid resistance tester", Road Note 27, Transport and Road Research Laboratory HMSO, TRRL, 1969.

Archive of SID