بهینه سازی شاخص وضعیت روسازی راه (PCI) بر اساس مشخصات طرح اختلاط مارشال (مطالعه موردی منطقه 2 شهر تهران)

رضا مؤیدفر، استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
علی تقدسی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: r-moayedfar@araku.ac.ir
دریافت: 1395/09/17 – پذیرش: 1396/02/15

چکیده

سامانه مدیریت و نگهداری روسازی ارزیابی وضعیت فعلی رویه‌های آسفالتی و همچنین پیش بینی وضعیت آن‌ها در آینده با توجه به پارامترهای تأثیرگذار بر آن‌ها می‌باشد. بدین منظور پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه مدل‌هایی برای پیشبینی شاخص PCI با استفاده از نتایج آزمایش مارشال برای منطقه 2 تهران بزرگ بسط داده شده‌اند. جهت تخمین PCI، درصد قیر، مقاومت مارشال، ترافیک عبوری و سن روسازی بر اساس تست‌های آماری نرم افزار SPSS به عنوان متغییر مستقل مناسب انتخاب شدند. برای مدل‌سازی از دو روش جداگانه استفاده شده، روش اول از طریق فرآیند رگرسیون و با استفاده از نرم‌افزار SPSS که از مدل خروجی آن برای بررسی تاثیر هریک از متغیرها بر مدل (تحلیل حساسیت) استفاده شده نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که مقاومت مارشال بیشترین تأثیر را به صورت مستقیم بر شاخص PCI دارد. روش دوم با بهره گیری از مفهوم برنامه نویسی ژنتیکی در نرم افزار GP ساخته شده و از مدل خروجی آن جهت بهینه‌سازی از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. برای انجام بهینه سازی از الگوریتم PSOو الگوریتم ژنتیک استفاده شده و مقدار بهینهٔ هر یک از متغیرهای مستقل برای ماکزیمم شدن شاخص PCI به دست آمده اند.

واژه‌های کلیدی: مدیریت و نگهداری روسازی، بهینه سازی شاخص وضعیت روسازی راه، طرح اختلاط مارشال، منطقه 2 شهر تهران

1- مقدمه

طی دهه‌های گذشته بطور قابل ملاحظه‌ای بر حجم و بارگذاری ناشی از ترافیک، افزوده شده است. این در حالی است که سرعت نوسازی و بهسازی راه‌های موجود بتدریج از روند احداث راه‌های جدید عقب مانده است. (شفابخش، غلامعلی، 1390). عملیات نگهداری راه‌ها اهمیت زیادی در حفظ و جلوگیری از اضمحلال زودرس راه‌ها و بهره‌گیری از حداکثر ظرفیت راه در عمر پیش بینی شده خدمت‌رسانی آن دارد. در این خصوص با توجه به این مهم که مسئله محدودیت بودجه برای عملیات نگهداری راه امری طبیعی به نظر می‌رسد لازم است تا ساختار مشخصی برای تخصیص بودجه تعمیر و نگهداری راه‌های گوناگون که امکان توزیع عادلانه امکانات و منابع را در پروژه‌های گوناگون تعمیر و نگهداری روسازی راه را فراهم می‌کند ایجاد گردد (رحیمی و همکاران، 1389).

امکان اولویت‌بندی راه‌ها جهت انجام اقدامات تعمیر و نگهداری می‌تواند به عنوان یکی از بهترین راهکارهای موجود در جهت تخصیص بهینه بودجه و نگهداشتن کیفیت روسازی این معابر در حدی قابل قبول مورد توجه قرار گیرد.

سیستم مدیریت روسازی شامل مجموعه کامل و

هماهنگی از فعالیت‌ها در زمینه برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت، نگهداری، ارزیابی، بهسازی، بازسازی و تحقیقات روسازی است. در این بین مرحله نگهداری از اهمیت بالایی برخوردار بوده و شامل برنامه ریزی و زمان بندی بین فعالیت‌های تعمیر، پرکردن ترک‌ها، وصله کاری و غیره به همراه جمع‌آوری داده‌ها به منظور ذخیره سازی در بانک اطلاعاتی می‌باشد. [مقدس‌نژاد، فریدون، 1386]

دستیابی به روش بهینه که در عین سادگی بتواند امکان پیشبینی وضعیت روسازی را بدون استفاده از وسایل گران قیمت و پیچیده فراهم سازد برای کشور در حال توسعه‌ای مانند ایران، توسط محققین و متخصصین امر مدیریت راه ضروری است.

2- پیشینه تحقیق

فریدون مقدس نژاد و آزاده منتظری پور مقاله‌ای با عنوان "ارایه یک برنامه مدیریت روسازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک" در سال 1386 درپژوهشنامهٔ حمل و نقل ارائه کردند که چکیده آن به شرح زیر است": سعی شده با استفاده از الگوریتمی نظام‌مند بتوان سیستمی را جهت نگهداری و مرمت روسازی بیان کرد. در این مقاله ابتدا پیرامون نوع الگوریت بحث شده است و در ادامه با مطرح کردن الگوریتم ژنتیک به عنوان اساس مقاله به بررسی استراتژی‌های گوناگون نگهداری پرداخته‌اند و با تعیین شبکه و دوره طرح به کدگذاری برای ورود به الگوریتم پرداخته‌اند که این پارامترها شامل مواردی همچون (دوره طرح، نوع خرابی، نگهداری و ترمیم، منابع مالی و پارامتر ترافیک) اشاره کرد که هرکدام دارای کدی در الگوریتم می‌باشند. از نتایج آن به عنوان مثال برای افزایش 10 درصد شاخص PCI نزدیک 8 درصد افزایش هزینه داریم و تعداد ترمیم‌ها نیز به میزان 20 درصد افزایش می‌یابد (مقدس نژاد، و منتظری، 1386).

- مؤیدفر، بهزاد هزاوه در سال 1393 از پایان نامه کارشناسی ارشد خود با موضوع "بهینه سازی شاخص PCI در سیستم‌های مدیریت روسازی برای شهر اراک" که چکیده آن به شرح زیر است : "هدف از این مطالعه، طراحی مدلی برای پیش بینی وضعیت روسازی از طریق شاخص PCI بوده است. در این تحقیق متغیرهای حجم ترافیک (ADT)، سن روسازی و عرض معبر، مورد بررسی قرار گرفته اند. به عنوان مطالعه موردی، راه‌های درون شهری اراک برای ارزیابی انتخاب شده اند. برای مدل سازی شاخص PCI، از دو روش جداگانه استفاده شده است. مدل اول از طریق فرآیند رگرسیون و با استفاده از نرم افزار SPSS و مدل دوم با بهره گیری از مفهوم برنامه نویسی ژنتیکی ساخته شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که متغیر حجم ترافیک بیشترین تاثیر را بر تغییرات شاخص PCI دارد. برای بهینه‌سازی مدل نیز از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. هدف از انجام بهینه سازی در این مطالعه، دستیابی به بیشینه این شاخص در ازای متغیرهای تعیین شده است. در این تحقیق مقدار بیشینه PCI برای معبری با عرض 9/75 متر و حجم ترافیک (ADT) 1795 و پس از گذشت 3/3 سال از تاریخ آخرین روکش، برابر 74/8 به دست آمده است." (مؤیدفر، 1393)

- رضا مؤیدفر، حمید راستگردانی در سال 1394 از پایان نامه کارشناسی ارشد خود با موضوع "تأثیر مشخصات آسفالت بر نشانه وضعیت روسازی (PCI) و بهینه سازی این شاخص با استفاده از الگوریتم‌های فرابتکاری (مطالعه موردی شهر اراک)" که چکیده آن به شرح زیر است: "ارزیابی وضعیت فعلی رویه‌های آسفالتی و همچنین پیشبینی وضعیت آنها در آینده با توجه به پارامترهای تأثیرگذار بر آنها همچنین ارائه روشی کارا جهت سنجش وضعیت رویه‌ها با توجه به مشخصات آسفالت از اهداف این تحقیق می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه مدل‌هایی برای پیشبینی شاخص PCIومقاومت مارشال با استفاده از نتایج آزمایش مارشال برای شهر اراک بسط داده شده‌اند. جهت تخمین PCI، درصد قیر، مقاومت مارشال، نرمی و درصد فضای خالی

مصالح و برای تخمین مقاومت مارشال، درصد قیر و نرمی و درصد فضای خالی نمونه مارشال و درصد فضای خالی پر شده با قیر بر اساس تست‌های آماری نرم افزار SPSS به عنوان متغییر مستقل مناسب انتخاب شدند. برای مدلسازی از دو روش استفاده شده، روش اول از طریق فرآیند رگرسیون و با استفاده از نرم‌افزار SPSS که نتایج تحلیل حساسیت نشان می دهد که مقاومت مارشال بیشترین تأثیر را به صورت مستقیم بر شاخص PCI دارد همچنین درصد فضای خالی پر شده با قیر بیشترین اثر را با نسبت معکوس روی مقاومت مارشال دارد. روش دوم با بهره گیری از مفهوم برنامه نویسی ساخته شده و از مدل خروجی آن جهت بهینه سازی با نرم افزار MATLAB استفاده شده است. برای انجام بهینه سازی از الگویتم PSOو الگوریتم ژنتیک استفاده شده و مقدار بهینهٔ هر یک از متغیرهای مستقل برای ماکزیمم شدن شاخص PCI و مقاومت مارشال به دست آمده اند. (مؤیدفر، 1394)

3- روش تحقیق

1- با مراجعه به ساختمان شهرداری منطقه 2 تهران و گرفتن نتایج آزمایش‌های آسفالت مربوط به هر قطعه که روکش آن انجام شده است. پس از آن به محل‌های نمونه‌گیری آسفالت و محاسبه شاخص وضعیت روسازی، آسفالت در قطعاتی به مساحت 300 مترمربع.

2- بررسی نرمال بودن داده‌ها که شامل داده‌های خروجی آزمایش مارشال و مقادیر محاسبه شده برای PCI بر اساس مشاهدات خرابی‌ها می‌باشد. تحقیق نرمال بودن از طریق مقایسه میزان چولگی با حد مجازصورت می گیردکه میزان انحراف از معیار در آزمون چولگی و کشیدگی باید عددی مابین 1.5- و 1.5 باشد تا داده‌ها به لحاظ نرمال بودن مشکلی نداشته باشند.

3- مدل‌سازی توسط نرم افزار SPSS روی داده‌های آماری به روش رگرسیون با قرار دادن PCI به عنوان متغییر وابسته و پارامترهای مورد نظر به عنوان متغیر مستقل و انتخاب روش ENTER برای ساخت مدل‌های خطی مختلف.

4- اعتبار مدل‌ها به لحاظ آماری با آزمون‌های مختلف بررسی می‌شود.

الف- آزمون t: به منظور تفاوت معناداری بین دو میانگین بکار می‌رود. این آزمون یک آزمون پارامتری است و در واقع به ما می‌گوید آیا متغیری که در مدل حفظ کردیم حفظ کردنش توجیح دارد یا خیر.

ب- آزمون F: در آن هم بستگی ترکیب متغییرهای مستقل با متغییر وابسته مورد سنجش قرار می‌گیرد در واقع مشخص می‌کند از بین ترکیب‌های مختلفی که بین متغییرهای مستقل و وابسته درست کرده‌ایم کدام از بقیه مناسبتر است.

اگر میزان signification در دو آزمون F و t بین صفر و 0/05 باشد نشان‌دهندهٔ قابلیت اطمینان بالا 0/95 و صحت آزمون صفر است.

ج- آزمون دوربین واتسون: این آزمون جهت تحلیل خود هم بستگی باقیمانده‌ها بکار می‌رود و اگر بین 1 تا 2/5 باشد قابل قبول است.

6- پس از انتخاب متغیرهای مستقل مناسب به وسیلهٔ آزمون‌های بالا، مدل غیر خطی اینتر با استفاده از این متغیرهای مستقل در نرم افزار SPSS ساخته می‌شود.

7- محاسبهٔ درصد خطای مدل رگرسیونی برتر در هر نمونه و سپس محاسبهٔ میانگین درصد خطا، سپس تحلیل حساسیت جهت مشخص کردن میزان و چگونگی تأثیر هر یک از متغییرهای مستقل روی متغییر وابسته بر روی مدل برتر رگرسیونی صورت می‌گیرد.

10- اعتبارسنجی مدل بدست آمده روی بقیه داده‌های آماری دیگر بررسی می‌شود تا قابلیت تعمیم‌پذیری مدل حاصل از روش رگرسیونی بررسی شود.

11. پس از مدلسازی‌های مختلف در نرم افزار SPSS و تعیین متغییرهای مستقل مناسب داده‌های مربوط به این متغییرها به همراه داده‌های محاسبه شده براساس مشاهدات خرابی‌ها برای PCI به عنوان متغییر وابسته وارد نرم‌افزار مخصوص مدلسازی GeneXpro می‌شود که از روش الگوریتم ژنتیک به صورت Function Finding برای مدلسازی استفاده می‌کند.

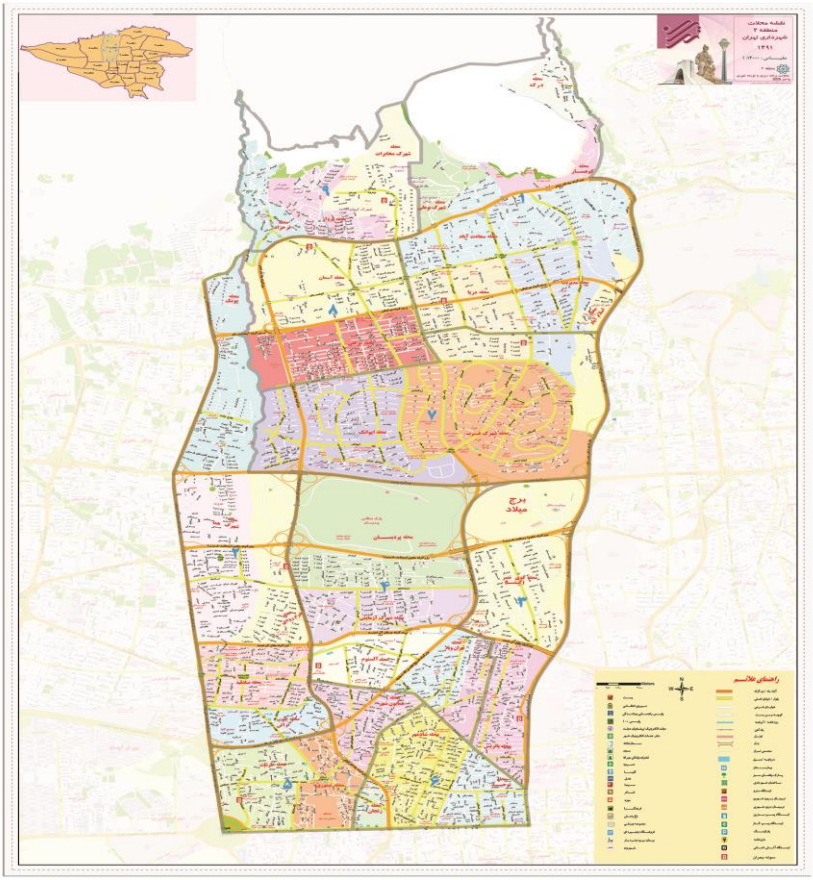
12- محاسبه درصد خطای مدل به دست آمده توسط GP برای هر نمونه و محاسبهٔ میانگین درصد خطا، سپس انجام فرایند اعتبارسنجی روی داده‌های آماری برای مدل ساخته شده در

.GP

14- بهینه‌سازی: از مدل به دست آمده از نرم افزار GeneXpro جهت بهینه‌سازی استفاده می‌شود و با توجه به قیود اختصاص داده شده به هر یک از متغییرهای مستقل مقدار بهینه هر یک از آنها جهت به دست آمدن PCI ماکزیمم به دست می‌آید.

4- منطقه مورد مطالعه

در این مقاله منطقه 2 تهران بزرگ مورد مطالعه قرار گرفته است که تقریبا از نظر شرایط آب و هوایی همه منطقه را می‌توان یکسان در نظر گرفت. در اینجا سعی بر ان شده است که از نقاط مختلف منطقه نمونه برداری انجام شود تا مدل ارائه شده را براحتی بتوان برای کل منطقه تعمیم داد.



شکل1. نقشه راه های درون شهری منطقه 2 تهران بزرگ

4- بحث و ارایه نتایج

اطلاعات ورودی همانند PCI مشاهده، سن روسازی، ترافیک عبوری، استقامت مارشال، درصد قیر ارایه خواهد شد.

4-1- مدلسازی به روش رگرسیون چند متغیر برای پیش‌بینی شاخص PCI

در این تحقیق از نرم افزار SPSS نسخه 22 برای مدلسازی استفاده شده است. متغیر وابسته بکار رفته در این تحقیق: شاخص وضعیت روسازی.

متغیرهای مستقل بکار رفته در این تحقیق: ترافیک میانگین روزانه در سال، درصد قیر، سن روسازی، استقامت مارشال.

جدول 1. اطلاعات ورودی مدل‌سازی

نمونه	Pci مشاهده	درصد قیر	استقامت مارشال(Kg)	ترافیک عبوری(AADT)	سن روسازی(ماه)
1	93.5	5.9	1011	1351	39
2	91.5	5.8	1222	1014	39
3	84	5.5	1269	436	36
4	94.1	5.6	1334	19	37
5	87.1	5.7	952	47	37
6	87	5.7	974	46	37
7	86.1	5	974	79	38
8	89.7	5.9	1271	973	37
9	92	6	887	27	39
10	92.1	5.9	1083	753	38
11	89.7	5.9	856	962	38
12	88.3	6.3	838	1278	38
13	87.8	6.4	729	942	38
14	87.2	6.1	767	1148	38
15	91	6	832	114	39
16	92.9	6.3	859	97	39
17	91.6	5.9	1500	67	39
18	88.8	6.1	1202	127	39
19	86.9	5.6	1087	53	38
20	87	6.3	925	135	39
21	90.8	6.1	976	85	39
22	87.5	6.1	869	29	39
23	91.2	6.2	1078	26	39
24	89.5	6.3	958	79	39
25	89.9	5.2	1231	21	30
26	87.1	4.8	865	14	30
27	93.8	4.4	748	19	30
28	86.3	5.2	1162	11	30
29	92.5	4.4	731	108	30
30	83	5.3	1045	35	30
31	90.8	4.1	802	1101	31
32	91.5	4.5	904	1245	31
33	91.6	4.7	1067	9	31
34	93	4.8	965	11	31
35	93.5	4.6	969	8	31
36	87	4.1	819	512	31
37	92	5.8	901	39	39

جدول**2**. ضریب همبستگی جزئی بین متغیرهای مستقل و وابسته

Correlations

		PCI	Darsade ghir	estehkam	Traffic	Age
PCI	Pearson Correlation	1	.104	.005	-.034	-.018
	Sig. (2-tailed)		.540	.975	.841	.918
	N	37	37	37	37	37
Darsadeghir	Pearson Correlation	.104	1	.168	.081	.072
	Sig. (2-tailed)	.540		.321	.633	.000
	N	37	37	37	37	37
Estehkam	Pearson Correlation	.005	.168	1	-.167	.139
	Sig. (2-tailed)	.975	.321		.323	.414
	N	37	37	37	37	37
Traffic	Pearson Correlation	-.034	.081	-.167	1	.135
	Sig. (2-tailed)	.841	.633	.323		.426
	N	37	37	37	37	37
Age	Pearson Correlation	-.018	.072	.139	.135	1
	Sig. (2-tailed)	.918	.000	.414	.426	
	N	37	37	37	37	37

4-1-1- نتایج بررسی ضریب همبستگی جزئی

ضریب هم‌بستگی جزئی (r) مقداریست بین صفر و یک، که صفر نشان دهنده استقلال کامل متغیر و 1 نشان‌دهنده وابستگی کامل متغیر می‌باشد.

4-1-2- نتایج مدلسازی خطی روش ENTER (شاخص PCI به عنوان متغیر وابسته)

جدول**3**. معیارهای دقت و صحت در روش **ENTER** براس شاخص **PCI**

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.245[a]	.060	-.057	2.93385

جدول **4**. تحلیل واریانس **ANOVA** برای مدل پیشنهادی

ANOVA

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	17.657	4	4.414	.513	.727[a]
	Residual	75.439	32	8.607		
	Total	293.096	36			

a Predictors: (Constant), age, traffic, estehkam, darsadeghir

جدول **5**. ضرائب مدل تخمین شاخص **PCI** در روش**ENTER**

Coefficients

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	T	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	77.136	7.140		10.804	.000
	darsadeghir	-2.085	1.705	-.202	-1.223	.224
	estehkam	.005	.004	.152	1.456	.149

age	.525	.267	.326	1.965	.052
traffic	-.001	.002	-.044	-.421	.675

R Square یا ضریب تعیین مقداری بین صفر و یک می‌باشد که در این مدل برابر 0/06 می‌باشد، با توجه به پراکندگی متغیرها، مقداری غیر قابل قبول است.

در این جدول سطح معنا داری (Sig)، برابر صفر نمی‌باشد. در این مدل ضریب تعیین به دست آمده به لحاظ آماری معنادار نمی‌باشد، زیرا باید سطح معناداری آن زیر 0.05 باشد که اینطور نیست.

ضرایب و مقادیر ثابت مدل ریاضی شاخص PCI در روش ENTER در جدول زیر آورده شده است.

مدل کالیبره شده خطی به شکل زیر خواهد بود :

PCI = -2,085 (darsade ghir) + 0,005 (estehkam) + 0,525 (age) – 0,001 (traffic)

با توجه که از آزمون‌های T test و F test جواب قابل قبولی به‌دست نیامد. R square می‌بایست حدود 70٪ باشد در حالی که 6٪ است. پس مدل خطی غیر قابل قبول بوده و رد می‌شود.

4-2- مدل سازی به روش برنامه نویسی ژنتیکی با نرم‌افزار GeneXPro

فرآیند مدل‌سازی در نسل 8370312 به اتمام می‌رسد. که در آن R square برابر با 0.73 می‌باشد. مدل نهایی در این حالت به دلیل استفاده از توابع مختلف، دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به مدل خطی است که به صورت زیر می‌باشد.

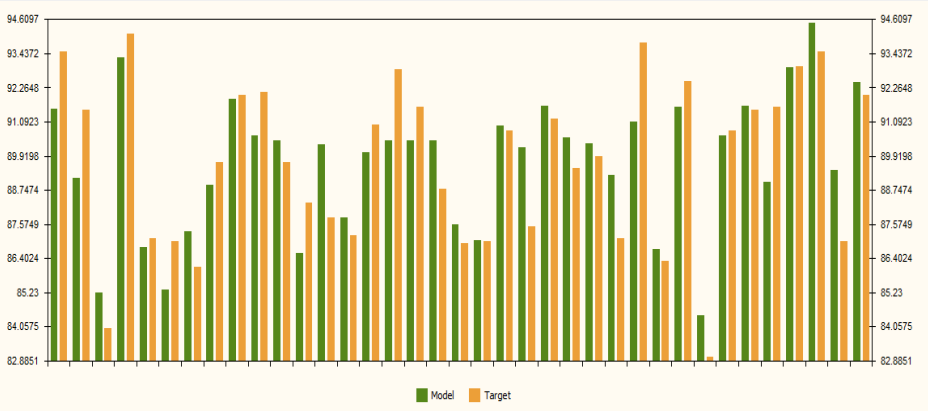
G1C0 = 4.766053; G1C1 = 2.685425; G2C0 = -4.087158; G2C1 = 6.003692;
G3C0 = 1.078338; G3C1 = 1.045867;
Pci = (((cos(d[3])-d[1])*log(G1C0))+(log(d[1])*sin(d[0])))+(sin(((d[2]*G2C1)/atan(G2C0)))*((d[2]-d[3])/exp(G2C1)))+pow(pow(((sqrt(G3C1)+(G3C0+G3C1))+((G3C0/d[3])/d[3])),2),2).

4-3- اعتبار سنجی مدل‌ها

جدول6. نتایج تحلیل اعتبار سنجی

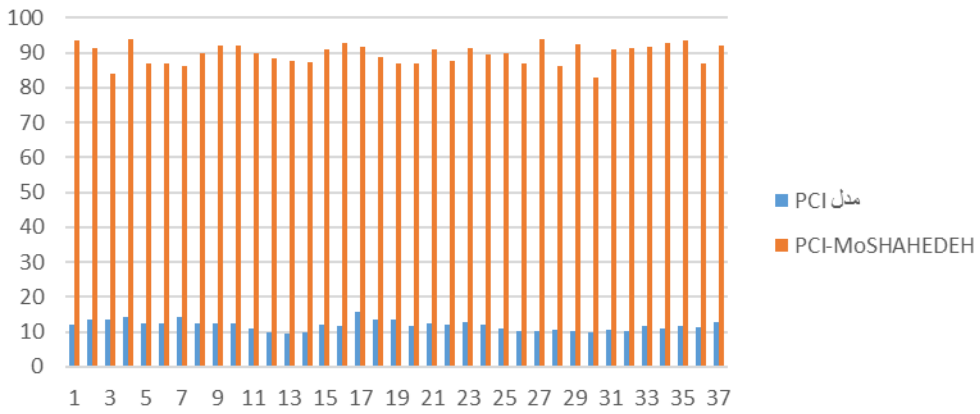
شماره نمونه	PCI مشاهداتی	PCI مدل Enter	درصد خطا	PCI مدل Gp	درصد خطا
1	93.5	11.877	87.29	98.821	5.6
2	91.5	13.478	85.26	97.774	6.85
3	84	13.341	84.11	95.285	13.43
4	94.1	14.4	84.69	98.583	7.95
5	87.1	12.253	85.93	97.267	11.67
6	86.1	14.316	83.37	96.368	11.92
7	89.7	12.505	86.05	98.399	9.69
8	92	12.373	86.55	97.363	9.09
9	92.1	12.310	86.63	99.211	7.7
10	89.7	10.966	87.77	98.488	9.79
11	88.3	9.726	88.98	96.819	9.64
12	87.2	9.918	88.62	97.376	11.67
13	91	12.011	86.8	97.709	7.37
14	92.9	11.537	87.58	96.109	7.7
15	91.6	15.606	82.96	99.402	8.51
16	88.8	13.639	84.64	98.672	11.11
17	87	11.829	86.4	96.737	11.19
18	90.8	12.551	86.17	96.407	10.58

13.73	99.515	86.2	12.072	87.5	19
9.33	99.714	85.84	12.912	91.2	20
12.03	98.269	86.76	11.848	89.5	21
10.76	99.579	87.7	11.042	89.9	22
11.06	96.739	88.45	10.053	87.1	23
3.36	96.957	89.02	10.297	93.8	24
11.6	96.333	87.59	10.707	86.3	25
5.99	98.048	89.05	10.123	92.5	26
6.33	96.550	88.28	10.635	90.8	27
6.51	97.464	88.84	10.167	91.5	28
6.84	97.87	87.11	11.801	91.6	29
9.1	95.48	88.08	11.081	93	30
8.66	96.598	87.67	11.521	93.5	31
12.69	98.0435	87.00	11.309	87	32
8.69	94.001	86.03	12.848	92	33



شکل 2. نمودار اختلاف بین **PCI** مشاهده و **PCI** مدل غیر خطی

شکل3. نمودار اختلاف بین **PCI** مشاهده و **PCI** مدل خطی**ENTER**



4-4- تحلیل حساسیت مدل GP

برای بررسی درصد تأثیر هریک از پارامترهای موجود در یک مدل، از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. تحلیل حساسیت در واقع مطالعه تاثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری است.

$$\text{نرخ تغییر} = \frac{\text{PCI(مدل)} - \text{PCI(به ازای تغییر ۲۰ درصدی هر متغیر)}}{\text{PCI(مدل)}} \times ۱۰۰$$

جدول7. نتایج تحلیل حساسیت مدل GP (نمونه شماره 7)

نتایج تحلیل حساسیت مدل GP (نمونه شماره 7)	
متغییر مستقل	میانگین درصد نرخ تغییر شاخص PCI نونه شماره 7
کاهش 20 درصدی سن روسازی	0.06
کاهش 20 درصدی درصد قیر	1.64-
کاهش 20 درصدی مقاومت مارشال	-1.42
کاهش 20 درصدی ترافیک	1.28

جدول 8. نتایج تحلیل حساسیت مدل GP (نمونه شماره 7)

نتایج تحلیل حساسیت مدل GP (نمونه شماره 7)	
متغییر مستقل	میانگین درصد نرخ تغییر شاخص PCI نمونه شماره 7
افزایش 20 درصدی سن روسازی	-1.37
افزایش 20 درصدی درصد قیر	0.93
افزایش 20 درصدی مقاومت مارشال	2.97
افزایش 20 درصدی ترافیک	-1.23

شاخص کیفیت روسازی با تغییرات درصد قیر و استحکام نسبت مستقیم دارد یعنی با افزایش آنها افزایش و با کاهش آنها کاهش می‌یابد و با تغییر مقدار متغییرهای ترافیک و سن روسازی نسبت عکس دارد ضمناً در میان این چهار متغییر بیشترین تأثیر بر روی شاخص PCI مربوط به استحکام مارشال است که تغییر آن بیشترین کاهش یا افزایش را روی این شاخص ایجاد می‌کند. پس از استحکام بیشترین اثر به ترتیب مربوط به درصد قیر و ترافیک و سن روسازی می‌باشد.

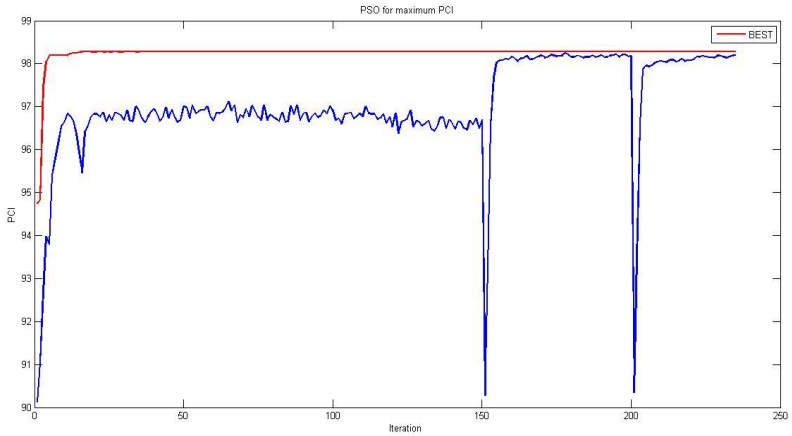
4-5- نتایج بهینه‌سازی مدل غیر خطی GP برای تخمین PCI با الگوریتم PSO

جدول9. قیود بهینه سازی شاخص PCI

متغییر مستقل	واحد	استاندارد	قید پایین	قید بالا
درصد قیر	%	ASTM	4.1	6.4
استحکام	Kg	MS-2	729	1335
ترافیک	AADT	-	8	1351
سن روسازی	ماه	-	30	39

جدول10. نتایج بهینه سازی مدل پیش‌بینی شاخص PCI با الگوریتم PSO

درصد قیر	استحکام	ترافیک	سن روسازی (ماه)	PCI (MAX)
4.1	1333.95	324	32.98	98.32



شکل4. نمودار همگرایی برای بهینه سازی شاخص PCI با الگوریتمPOS

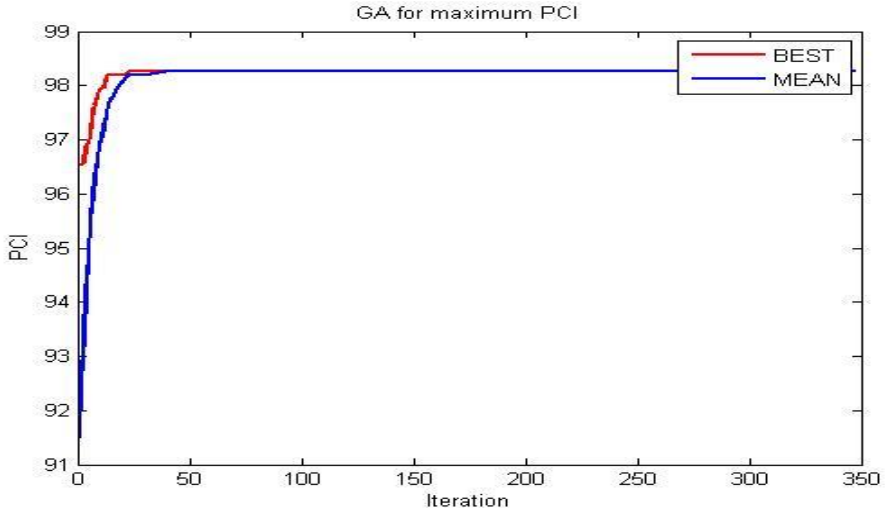
4-6- نتایج بهینه‌سازی مدل غیر خطی GP برای تخمین PCI با الگوریتم ژنتیک

جدول11. قیود بهینه سازی شاخص PCI

متغییر مستقل	واحد	استاندارد	قید پایین	قید بالا
درصد قیر	%	ASTM	4.1	6.4
استحکام	Kg	MS-2	729	1335
ترافیک	AADT	-	8	1351
سن روسازی	ماه	-	30	39

جدول12. نتایج بهینه سازی مدل پیش‌بینی شاخص PCI با الگوریتم ژنتیک

درصد قیر	استحکام	ترافیک	سن روسازی (ماه)	PCI (MAX)
5.2	1312.05	230	33.18	97.12



شکل5. نمودار همگرایی برای بهینه سازی شاخص PCI با الگوریتم ژنتیک

5- نتیجه‌گیری

1- به منظور پیش بینی شاخص PCI به روش مدل‌سازی آماری توسط روش اینتر با ضریب تعیین 0.06 عملکرد غیر قابل قبولی به همراه داشت.

2- در مدلسازی به روش برنامه‌نویسی ژنتیکی با نرم‌افزار GP در Generation برابر با 8370312 مدلی غیر خطی با ضریب تعیین 0/735 به دست آمد. و با توجه به این ضریب به عنوان مدل برتر برای بهینه‌سازی انتخاب شد.

3- فرایند اعتبارسنجی روی مدل اینتر و مدل GP انجام گرفت که میزان خطا در مدل Gp کمتر 15 درصد بود، اما درصد خطا در مدل اینتر غیر قابل قبول می‌باشد.

4- با انجام تحلیل حساسیت بر روی مدل اینتر میزان تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل رو شاخص PCI مشخص گردید که بیشترین تأثیر به ترتیب مربوط به استحکام مارشال، درصد قیر، ترافیک عبوری و سن روسازی بود. ضمناً نتایج تحلیل حساسیت نشان داد با افزایش پارامتر درصد قیر و استحکام مارشال شاخص PCI افزایش و باالعکس، همچنین ترافیک عبوری و سن روسازی با شاخص PCI نسبت عکس دارند.

5- با انجام بهینه سازی با استفاده از نرم افزار متلب روی مدل حاصل از نرم افزار GP با دو الگوریتم مختلف مقادیر بهینهٔ هر یک از متغیرهای مستقل برای ماکزیمم شدن شاخص PCI به این ترتیب به دست آمد:

- ✓ بهینه‌سازی با الگوریتم PSO: درصد قیر برابر با 4.1 درصد، استحکام مارشال 1333.95 کیلوگرم، ترافیک عبوری 8 و سن روسازی برابر با 32.98 ماه، که به ازای آن‌ها میزان PCI برابر 98.32 می‌شود.
- ✓ بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک: درصد قیر برابر با 5/2 درصد، استحکام مارشال 1312.05 کیلوگرم، ترافیک عبوری 12 و سن روسازی برابر با 33.18، که به ازای آنها میزان PCI برابر 97.12 می‌شود.

6- فرایند اعتبار سنجی روی مدل غیرخطی برای 33 نمونه آزمایشگاهی صورت گرفت و درصد خطا برای هر نمونه کمتر از 15 درصد بود.

6- پیشنهادات برای تحقیقات آتی

- ✓ ایجاد یک پایگاه داده گسترده‌تر جهت افزایش دقت مدل‌سازی.
- ✓ در نظر گرفتن متغیرهای دیگر مانند استفاده از قیرهای متفاوت و یا اصالح شده، درصد افزودنی مخلوط و... به منظور ایجاد مدل‌سازی.
- ✓ ایجاد یک پایگاه داده گسترده‌تر جهت افزایش دقت مدل‌سازی.
- ✓ تحقیق بر روی ارتباط میان نرخ تصادفات و شاخص‌های روسازی.
- ✓ تحقیق بر روی ارتباط میان هزینهٔ نگهداری راه و شاخص‌های روسازی.

7- پی‌نوشت‌ها

1. Genetic Programming
2. Skewness
3. Kurtosis
4. Generation

8- مراجع

- رمضانپور، ح.، (1380)، " بررسی و مقایسه روش‌های ارزیابی روسازی (PCI, MCI,PSI) و امکان استفاده از این روش‌ها در ارزیابی راه‌های کشور با توجه به امکانات موجود "- پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، ص. 2-3.

-رحیمی، ک.، و زنگانه رنجبر، پ.، (1389)، "ارائه مدلی جهت اولویت بندی تعمیر و بهسازی روسازی‌های آسفالتی"، همایش ملی یافته‌های نوین در مهندسی عمران، نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، ص.3-5.

- مؤیدفر، ر.، هزاوه، ب.، "بهینه‌سازی شاخص PCI در سیستم‌های مدیریت روسازی برای شهر اراک" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک.

– مؤیدفر، ر.، راستگردانی، ح.، (1394)، "تأثیر مشخصات آسفالت بر نشانه وضعیت روسازی (PCI) و بهینه‌سازی این شاخص با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری (مطالعه موردی شهر اراک)" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، 1394.

– شفابخش، غ. ع.، شاه‌حسین، الف.، و تقی‌زاده، م.، (1394)، "بررسی ارایه مدل ریاضی به منظور برآورد هزینه نگهداری راه"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان، ص.3–7.

– صحاف، س.ع. و مسعودی، س. م.، (1394)، "ارزیابی وضعیت شبکه روسازی معابر با استفاده از شاخص کیفیت فازی روسازی و مقایسه با شاخص PCI (مطالعه موردی منطقه 17 شهرداری تهران)"، کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران، تهران، موسسه آموزش عالی مهر اروند، مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار.

– مقدس نژاد، ف.، (1387)، "چارچوب *سیستم مدیریت* روسازی راهها در ایران"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، جزوه دانشگاهی.

– مقدس‌نژاد، ف.، و منتظری پور، الف.، (1386)، "ارایه یک برنامه مدیریت روسازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک" پژوهش‌نامه حمل و نقل. ص. 248–235.

– عامری، م و افتخارزاده، ف.، (1389)، "مدیریت روسازی برای راه‌ها، فرودگاه‌ها و پارکینگ‌ها" تهران، چاپ دوم.

- Akkarapol Tangphaisankun, Pannapa Herabat (2005), ‘‘Multi-Objective Optimization Model using Constraint-Based Genetic Algorithms for Thailand Pavement Management ", Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.

- Danial Moazami, Hamid Behbahani & Ratnasamy Muniandy (2011), ‘‘Pavement rehabilitation and maintenance prioritization of urban roads using fuzzy logic ", Expert Systems with Applications, Elsevier Ltd.

- Dr. Stephen A. Arhin, P.E., PTOE and Dr. Errol C. Noel, P.E (2014), ‘‘Predicting Pavement Condition Index Using International Roughness Index in Washington DC ", District Department of Transportation.