

شبکه عصبی - فازی و بهینه‌یابی هزینه‌ها توسط الگوریتم ژنتیک در مدل‌سازی مقاومت مارشال^۱ در تثبیت خاک با امولسیون و سیمان*

سید مرتضی مرندی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
پروین صفاپور، عضو هیئت علمی، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
محمد حسین باقری پور، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
مجتبی قاسمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
E-mail: marandi@mail.uk.ac.ir

چکیده

امروزه روش‌های هوشمند در پیش‌بینی پارامترهای کمیته‌ها می‌توانند به عنوان ابزاری قدرتمند برای بهینه‌سازی مدل‌های پیش‌بینی بکار روند. در این تحقیق دو هدف، یکی مدل‌سازی مقاومت مارشال نمونه‌های تثبیت شده با امولسیون قیر و سیمان جهت زیرسازی جاده‌ها و دیگری بهینه‌یابی هزینه‌های اجرایی کاربرد امولسیون قیر و سیمان در تثبیت این نوع زیرسازی دنبال شده است. به این منظور ۱۷۰ آزمایش بر روی نمونه‌های تثبیت شده برای آموزش شبکه عصبی- فازی انجام شده و مورد استفاده قرار گرفته اند. سپس مقاومت مارشال نمونه‌ها، توسط شبکه هوشمند عصبی- فازی مدل شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک هزینه‌های اجرایی بهینه‌یابی شده است. در مدل سازی انجام شده از نرم افزار *MATLAB* استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با مدل پیشنهادی می‌توان تا حدود زیادی در هزینه‌های ساخت جاده‌ها صرفه‌جویی کرد.

واژه‌های کلیدی: مدل سازی مقاومت مارشال، تثبیت خاک، امولسیون، سیمان

۱. مقدمه

معمول تا حدود پنج درصد (وزنی) امولسیون قیر به مصالح دانه‌ای در ساخت جاده افزوده می‌شود. در بسیاری موارد استفاده از امولسیون قیر و سیمان به عنوان روشی مؤثر و کاربردی شناخته شده است [۱]. درصد سیمانی که اضافه می‌شود، بسته به روش طراحی ممکن است تا سه و نیم درصد (وزنی) تغییر کند [۲]. یکی از معیارها در طراحی و کنترل کیفیت مصالح تثبیت شده با امولسیون قیر و سیمان، مقاومت مارشال آن است که در این تحقیق مقاومت مارشال با استفاده از بارگذاری در دستگاه یونیورسال به دست آمده است. مقاومت مارشال مصالح تثبیت شده با امولسیون قیر و سیمان تابعی از درصدهای امولسیون

ساخت و توسعه راه‌ها از مبانی پیشرفت اقتصادی و فرهنگی کشورهاست. با توجه به هزینه‌های سنگین راهسازی و نگهداری راه‌ها، ضرورت استفاده از فناوریهای جدید و پیشرفته طراحی و اجرا و کنترل کیفی راه‌ها برای افزایش عمر آنها روز به روز نمایان‌تر می‌شود. از طرفی با توجه به هزینه‌های سنگین آزمایشگاهی و مشکل دسترسی به آزمایشگاه، بخصوص در پروژه‌های دور افتاده، به مطالعه روش‌های کم هزینه‌تر و با قابلیت دسترسی بیشتر، نیاز است. یکی از روش‌های جدید تثبیت مصالح، تثبیت با امولسیون قیر و سیمان است. امولسیون قیر از ذرات بسیار ریز قیر، آب و ماده امولسیون‌ساز تشکیل شده است. به طور

قیر و سیمان مصرفی، دانه بندی و خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده است [۳].

در تحلیل بسیاری از مسایل و پدیده‌ها، مانند مقاومت مارشال مصالح تثبیت شده، ارایه یک رابطه ریاضی بین توابع و متغیرهای مربوطه، به دلیل ماهیت مسئله، دشوار و گاهی دور از دسترسی است، بنابراین در این تحقیق رابطه‌ای ریاضی توسط شبکه هوشمند عصبی - فازی مدل سازی شده است. نتایج استفاده از این مدل نشان می‌دهند که می‌توان هزینه‌های اجرایی را به گونه‌ای محسوس کاهش داد.

۲. امولسیون قیر

امولسیون قیر به صورت ملکولهای ریز قیر در آب شناور است. ماده امولسیون ساز از چسبیدن این قطرات به یکدیگر جلوگیری می‌کند. زمانی که امولسیون قیر با سنگدانه‌های معدنی مخلوط می‌شود، بر حسب ترکیب آن با سرعت‌های مختلف می‌شکند. سپس عملکرد ماده امولسیون ساز از بین رفته و قطرات قیر به سنگدانه‌ها و به یکدیگر می‌چسبند و به صورت پرده نازکی از قیر در اطراف سنگدانه‌ها در می‌آیند. امولسیونها در دو نوع مختلف ساخته می‌شوند که تفاوت آنها در بار ذرات معلقشان است. یکی از این دو نوع امولسیون قیر آنیونی است که در آن ذرات قیر دارای بار منفی و دیگری امولسیون قیر کاتیونی است که در آن ذرات قیر دارای بار مثبت هستند. امروزه بیشتر از امولسیون‌های قیر کاتیونی در اجرا استفاده می‌شود [۴]. امولسیون‌های کاتیونی به ویژه با سنگدانه‌های معدنی اسیدی مانند گرانیت و کوارتزیت بهتر عمل می‌کنند. امولسیون‌های قیر کاتیونی می‌توانند برای شکسته شدن در زمانهای مختلف بعد از مخلوط شدن با سنگدانه و سیمان فرمول بندی شوند. هر دو نوع امولسیون قیر می‌توانند با سنگدانه‌های معدنی مرطوب مخلوط شوند. در شکل ۱ ترکیب و مشخصات امولسیونهای قیر کاتیونی و آنیونی مقایسه شده است [۵]. هر دو نوع امولسیون قیر با تغییر در نوع امولسیون ساز (امولگاتور) و میزان افزودنی‌های دیگر می‌توانند در سه نوع تولید شوند، نوع تند گیر $(RS)^2$ نوع کند گیر $(MS)^3$ و نوع دیرگیر $(SS)^4$. اما در ایران به علت نوبت بودن این تکنولوژی تنها نوع کاتیونی دیرگیر برای استفاده در پروژه‌ها تولید می‌شود. اغلب کارخانه‌ها، همه انواع و اقسام امولسیونهای قیری را تولید می‌کنند. به علت این که امولسیونهای نوع مشابه از کارخانه‌های مختلف در یک نوع خاک

ممکن است تأثیر متفاوتی داشته باشند لازم است قبل از مصرف امولسیون قیر، در آزمایشگاه بررسی‌های لازم صورت پذیرد. در صورتی که اطلاعات لازم در دسترس نباشد مقدار امولسیون قیر مورد نیاز برای تشکیل چسبندگی لازم بین ذرات مصالح از رابطه (۱) استفاده می‌شود [۶].

$(1) 75(0.05A+0.10B+0.50C) =$ درصد وزنی امولسیون قیر در رابطه (۱)،

$A =$ درصد مانده روی الک شماره ۸

$B =$ درصد گذشته از الک شماره ۸ و

$C =$ درصد گذشته از الک شماره ۲۰۰ می باشد.

۳. تثبیت با امولسیون قیر

امولسیون قیر می‌تواند به آسانی با خاک مرطوب مخلوط شود تا قیر در میان خاک به خوبی پخش و پراکنده شود. امولسیون قیر به وفور برای تثبیت خاک استفاده می‌شود. خاکهای شنی و ماسه‌ای تمیز با $PI < 6$ برای تثبیت با امولسیون قیر مناسب‌اند.

این نوع خاکها در دسته بندیهای زیر قراردارند:

$$\left[\frac{(SM - SC) - (GW - GS) - (SW - SM)}{-(GW - GM) - (SM - GW)} \right]$$

نکته قابل یادآوری در مورد تثبیت خاک با امولسیون قیر این است که قبل از تراکم، بایستی آب اضافی با هوادهی^۵ از بین برود تا به شکسته شدن امولسیون قیر منجر شود [۶].

امولسیون قیر معمولاً با درجه نفوذ قیر بین ۱۲۰ تا ۱۸۰ برای خاکهایی که عبوری آنها از الک $75\mu m$ بین صفر تا ۱۰ درصد است ساخته می‌شوند. برای خاکهای با درصد ریز دانه‌های بیشتر (۱۵ تا ۲۵ درصد گذشته از الک $75\mu m$) ممکن است به علت مشکلات پخش مصالح از قیری با درجه نرمی بیشتر استفاده شود. در شرایط خاص، ممکن است امولسیون قیر همراه با نفت نیز استفاده شود [۶].

۴. شبکه عصبی - فازی

سیستم‌های فازی، سیستم‌هایی هستند که برای ایجاد نگاشت غیرخطی از ورودی به خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]. این نوع شبکه‌ها برای سیستم‌هایی که نمی‌توان توصیف دقیقی برای آنها یافت، کاربرد دارند. سیستم‌های فازی بر پایه مجموعه‌ای از قوانین استوارند که با این قوانین بر اساس دانش بشری و

انجام شد. این آزمایش به طور مرسوم با آب انجام نشد، بلکه از مخلوط ۵۰ درصد آب و ۵۰ درصد امولسیون قیر استفاده شد [۵]. پس از انجام این آزمایش، درصد سیال بهینه برای خاک تهیه شده برابر ۸/۵ درصد به دست آمد.

۶. روابط حاکم

برای به دست آوردن میزان سیمان، آب و امولسیون قیر که باید به خاک اضافه شود، از روابط زیر استفاده شده است:

$$W_{OCC} = W_{OFC} - W_{Reduction} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، W_{OCC} = مقدار آب برای تراکم و کارایی بهینه (درصد جرمی)، W_{OFC} = مقدار رطوبت بهینه (درصد جرمی) و $W_{Reduction}$ = میزان کاهش (درصد جرمی) طبق شکل ۳ است.

$$M_{Cement} = \left(\frac{C \times M_{Mineral}}{100} \right) \times \left[1 + \frac{C}{100} \right] \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، C = مقدار سیمان (درصد جرمی)، M_{Cement} = وزن سیمان (جرمی) و $M_{Mineral}$ = وزن خاک خشک (گرم) است.

$$W_{Add} = W_{OCC} - \left(\frac{P_W + 0.5 \times P_B}{100} \right) \times B_{Emul.} - W_{Moist} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، W_{Add} = مقدار آبی که باید افزوده شود (درصد جرمی)، M_{OCC} = مقدار رطوبت تراکم بهینه (درصد جرمی)، $B_{Emul.}$ = مقدار امولسیون قیر (درصد جرمی)، W_{Moist} = مقدار رطوبت نمونه مرطوب (درصد جرمی)، P_W = درصد آب در امولسیون قیر (درصد جرمی) و P_B = درصد قیر در امولسیون قیر (درصد جرمی) است.

$$M_{Water} = \left(\frac{W_{Add}}{100} \right) \times (M_{Mineral} + M_{Cement}) \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، W_{Add} = مقدار آبی که باید افزوده شود (درصد جرمی)، M_{Water} = وزن آب افزوده شده (گرم)، $M_{Mineral}$ = وزن سنگ دانه خشک (گرم)، M_{Cement} = وزن سیمان افزوده شده (گرم) است.

$$M_{Emul} = \left(\frac{B}{100} \right) \times (M_{Mineral} + M_{Cement}) \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، B_{Emul} = مقدار امولسیون قیر (درصد جرمی)، M_{Emul} = وزن امولسیون قیر افزوده شده (گرم)، $M_{Mineral}$ = وزن سنگ دانه خشک (گرم) و M_{Cement} = وزن سیمان افزوده شده (گرم) است. برای انجام آزمایش مارشال، از استاندارد

با بهره‌گیری از تجربیات افراد خیره در زمینه مورد نظر استخراج می‌شوند. امروزه سیستم‌های فازی در بسیاری از امور و با طیف وسیعی از قابلیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]. ویژگی بسیار مهم این نوع سیستم‌ها این است که نیازی به فرمول یا مدل ریاضی برای طراحی ندارند، بنابراین در مورد طراحی سیستم‌هایی که نتوان عملکرد آنها را به صورت مدل ریاضی بیان کرد بسیار مفید و مناسب به نظر می‌رسند. به‌طور کلی آنچه یک سیستم فازی انجام می‌دهد، تبدیل دانش بشری در قالب مجموعه‌های فازی به یک فرمول ریاضی با قابلیت غیرخطی است. پارامترهای موجود در سیستم‌های مذکور [وزن‌های ارتباطی برای مقادیر ورودی، وزن‌های ارتباطی برای مقادیر بایاس (انحراف اولیه) و وزن‌های ارتباطی برای مقادیر خروجی] با استفاده از تجربیات طراح سیستم تعیین می‌شوند. اگر بتوان سیستم فازی را به گونه‌ای تغییر داد که امکان بهنگام سازی مقادیر فوق میسر باشد، به نحوی که سیستم خود قادر باشد در جهت نزدیک سازی به مقادیر مطلوب و بهینه اقدام کند، در این صورت می‌توان به سیستم فازی با دقت بیشتر در خروجی دست‌یافت. برای تحقق این مهم، باید امکان پس‌خور مقادیر از انتها به سمت ابتدای شبکه و از طریق خطای حاصله در خروجی، وجود داشته باشد. این کار از طریق شبکه‌های عصبی امکان‌پذیر است [۹،۸]. بنابراین با ایجاد قواعد فازی به وسیله شبکه عصبی، می‌توان به ایده مورد نظر دست یافت. شبکه عصبی مزبور شبکه فازی-عصبی^۶ نامیده می‌شود.

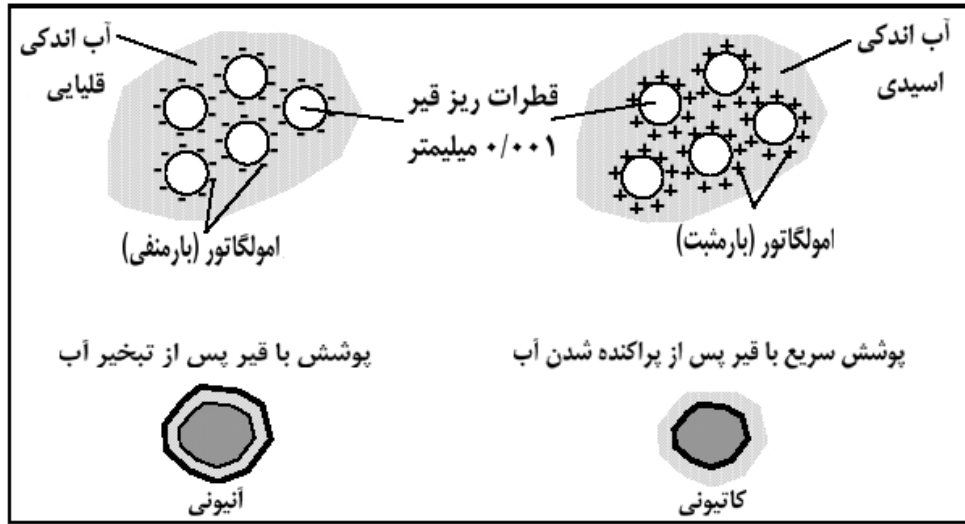
۵. تهیه داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی - فازی

در این تحقیق برای تهیه داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی-فازی، از ۱۷۰ آزمایش مارشال انجام گرفته بر روی مصالح تثبیت شده با سیمان و امولسیون قیر استفاده شده است. برای ساختن نمونه‌های مارشال، درصدهای مختلف سیمان و امولسیون قیر به یک نوع مصالح سنگی با دانه بندی شده مشخص افزوده شده است. در این راستا ابتدا مصالح سنگی دانه‌بندی شده و سپس مقادیر مشخصی از مصالح با دانه‌بندی مشخص که محدوده منحنی های در شکل ۲ نشان داده شده است بکار گرفته شدند^۷.

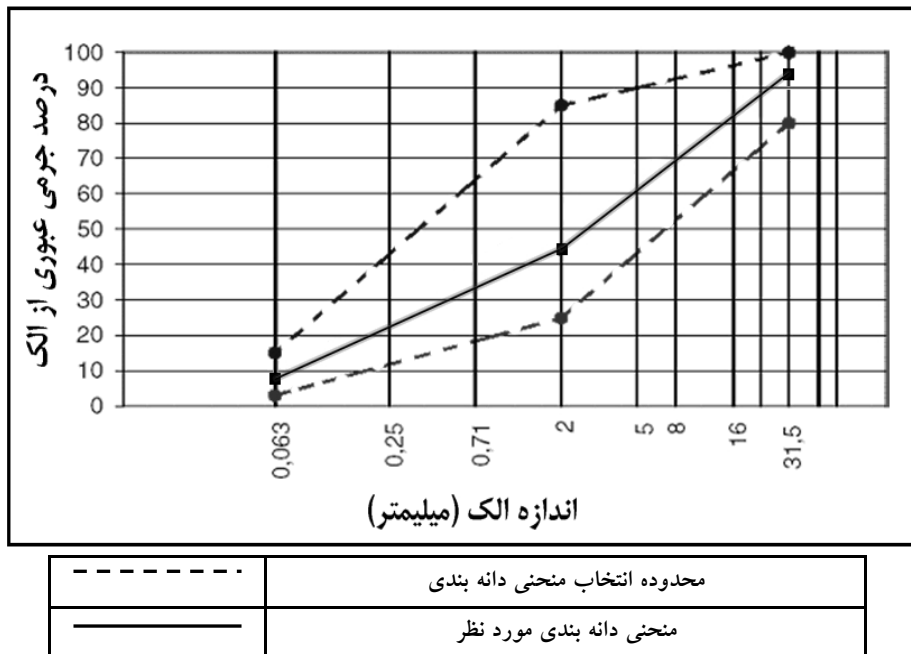
درصد رطوبت طبیعی خاک طبق آزمایش استاندارد **ASTM D2216** برابر ۰/۵ درصد به دست آمد. آزمایش پراکتور برای تعیین مقدار رطوبت بهینه طبق استاندارد **ASTM D 698-00**

استوانه با قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر و با تغییر رنگ آن از قهوه‌ای به سیاه است. محدوده افزودن امولسیون قیر به مصالح یک تا شش درصد (وزنی) و برای سیمان یک تا سه درصد (وزنی) مصالح در نظر گرفته شد. پس از عمل آوری، مقاومت مارشال نمونه‌ها توسط ملحقات مارشال و دستگاه بارگذاری یونیورسال^۱ تعیین شدند.

ASTM D 1559 استفاده شد. نمونه‌های مارشال به شکل وارد کردن ۷۵ ضربه چکش استاندارد ۴/۵۵ کیلوگرمی به هر طرف نمونه ساخته شدند. در این راستا، ابتدا مقدار مشخصی آب و سیمان توزین شده و به خاک مرطوب افزوده شدند. سپس امولسیون قیر مورد نظر اندازه‌گیری و به مخلوط اضافه شد. نشانه شکستن امولسیون قیر



شکل ۱. مشخصات امولسیونهای قیر [۵]



شکل ۲. منحنی دانه بندی برای تثبیت خاک با امولسیون قیر [۵]

(الف و ب)، ۷ و ۸ نشان داده شده است. در این شکلها، منحنی تغییرات مقاومت مارشال بر حسب تغییرات درصد امولسیون قیر مصرفی و درصدهای مختلف سیمان (۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۲/۷۵ و ۳ درصد) رسم شده است. در نمودارهای شکل ۶ تغییرات مقاومت مارشال بر حسب تغییرات درصد سیمان مصرفی برای درصدهای مختلف امولسیون قیر (۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ درصد) نشان داده شده است. منحنی‌های شکل ۵ نشان می‌دهند که با افزایش درصد امولسیون قیر، مقاومت مارشال کاهش می‌یابد. این تغییرات را می‌توان چنین تفسیر کرد که هرچه مقدار امولسیون قیر در مخلوط بیشتر شود، لغزش بین ذرات خاک بیشتر شده و نرمی مخلوط افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش درصد امولسیون قیر، شکل پذیری لایه خاک تثبیت شده افزایش یافته (که جزو اهداف اولیه تثبیت است) اما، استحکام آن کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش مصرف امولسیون قیر تا یک میزان مشخص، می‌تواند اهداف تثبیت خاک را برآورده سازد و بیش از آن حد مشخص، مفید نخواهد بود. بنابراین با طراحی دقیق می‌توان به مقدار بهینه مصرف امولسیون دست یافت که این امر یکی از اهداف این تحقیق است. همچنین با توجه به شکل‌های ۵ می‌توان دریافت که افزایش درصد امولسیون قیر به‌طور میانگین باعث ۷۷/۵ درصد کاهش در مقاومت مارشال شده است. بیشترین میزان کاهش زمانی است که از ۳ درصد سیمان استفاده شده است (۷۹ درصد) و کمترین میزان آن زمانی است که از ۲/۵ درصد سیمان استفاده شده است (۷۵ درصد). بنابراین مقدار سیمان مصرفی به اندازه‌ای مورد نیاز است که پس از دستیابی به مقاومت مورد نظر، مخلوط حاصل، از انعطاف پذیری مورد انتظار نیز برخوردار باشد. منحنی‌های شکل ۶ نشان می‌دهند که با افزایش درصد سیمان، مقاومت مارشال افزایش می‌یابد. می‌توان این مطلب را چنین تفسیر کرد که هرچه مقدار سیمان در مخلوط بیشتر شود، رفتار مخلوط به رفتار بتن نزدیک‌تر شده و در نتیجه استحکام مخلوط افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش درصد سیمان مصرفی در مخلوط، استحکام لایه خاک تثبیت شده افزایش یافته (که جزو اهداف اولیه تثبیت است) ولی شکل پذیری آن بواسطه افزایش رفتار بتنی، کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش مصرف سیمان تا یک میزان مشخص، می‌تواند اهداف تثبیت خاک را برآورده سازد و بیش از آن حد مشخص، مفید نیست. بنابراین با طراحی دقیق می‌توان به مقدار بهینه مصرف سیمان دست یافت که مورد دیگری از اهداف این تحقیق بوده است. منحنی‌های شکل ۶ نشان

برای انجام آزمایش مارشال، از استاندارد *ASTM D 1559* استفاده شد. نمونه‌های مارشال به شکل استوانه با قطر ۱۰۱/۶ میلیمتر و ارتفاع ۶۳/۵ میلیمتر و با وارد کردن ۷۵ ضربه چکش استاندارد ۴/۵۵ کیلوگرمی به هر طرف نمونه ساخته شدند. در این راستا، ابتدا مقدار مشخصی آب و سیمان توزین شده و به خاک مرطوب افزوده شدند. سپس امولسیون قیر مورد نظر اندازه‌گیری و به مخلوط اضافه شد. نشانه شکستن امولسیون قیر تغییر رنگ آن از قهوه‌ای به سیاه است. محدوده افزودن امولسیون قیر به مصالح یک تا شش درصد (وزنی) و برای سیمان یک تا سه درصد (وزنی) مصالح در نظر گرفته شد. پس از عمل آوری، مقاومت مارشال نمونه‌ها توسط ملحقات مارشال و دستگاه بارگذاری یونیورسال^۱ تعیین شدند.

برای تعیین مقادیر امولسیون قیر و سیمان بهینه معمولاً از روش طرح اختلاط مندرج در آئین نامه مشخصات فنی - اجرایی بازیافت سرد آسفالت مصوب نود و ششمین جلسه شورای عالی فنی امور زیربنایی حمل و نقل وزارت راه و ترابری ایران استفاده می‌شود [۱۰].

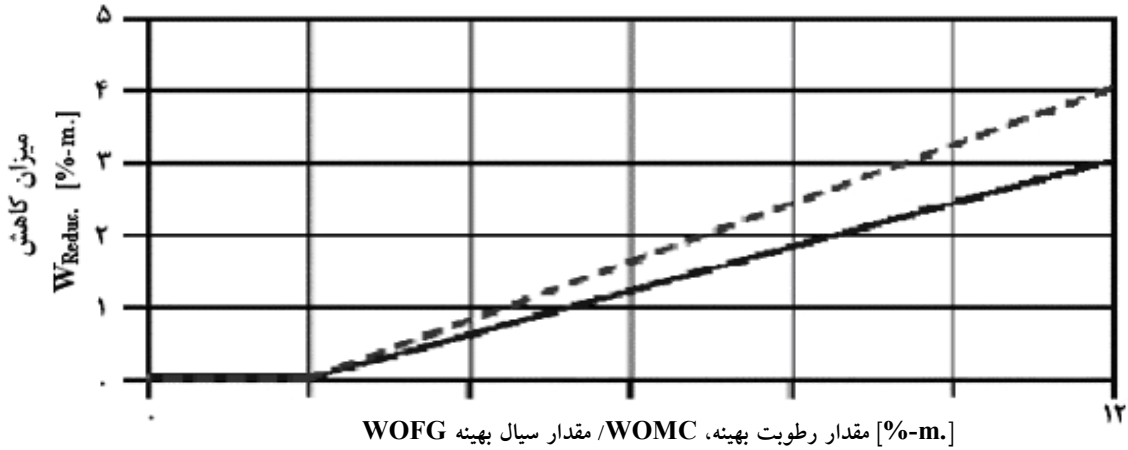
بر اساس این آئین نامه، بیشینه مقدار سیمان مصرفی به ۲ درصد محدود شده است. این محدودیت به این علت است که افزایش سیمان و مصرف بیش از اندازه آن سبب افزایش صلبیت و کاهش انعطاف پذیری، کاهش تاب خستگی و افزایش گسترش ترکهای انقباضی می‌شود. در این تحقیق با در نظر گرفتن محدودیت یاد شده و استفاده از نتایج انجام ۱۷۰ آزمایش مارشال و بکارگیری بهینه سازی هزینه ساخت توسط روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک، منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۴ برای تعیین مقادیر امولسیون قیر و سیمان بهینه ارایه شده است. با در نظر گرفتن عدد مشخصی به عنوان مقاومت مارشال مورد انتظار با هزینه ساخت بهینه و استفاده از شکل ۴ می‌توان مقادیر امولسیون قیر و سیمان بهینه را برای مخلوط خاک مورد نظر تعیین کرد. شکل ۴ نشان می‌دهد که مقاومت مارشال با افزایش درصد سیمان افزایش یافته در صورتی که با افزایش درصد امولسیون قیر، کاهش پیدا می‌کند.

۷. تجزیه و تحلیل و نتایج

نتایج حاصل از آزمایشهای مارشال انجام گرفته بر روی نمونه‌های ساخته شده در شکل‌های ۵ (الف، ب، ج، د، ه، و، ز)، ۶،

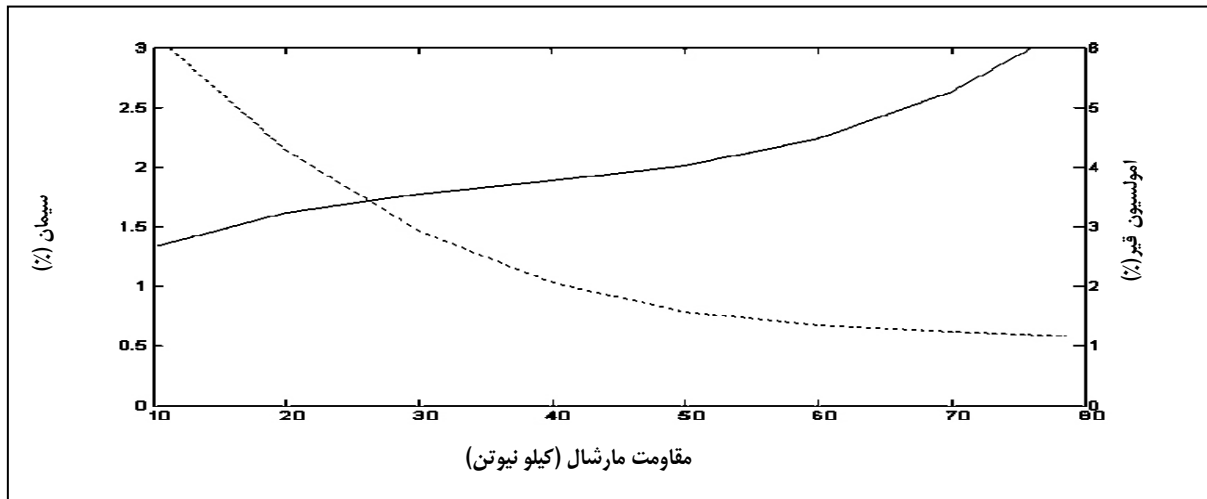
امولسیون قیر استفاده شده است. همچنین شکل ۶ نشان می‌دهد که نرخ افزایش مقاومت در اثر استفاده از سیمان، با افزایش مقدار امولسیون از ۱ تا ۲ درصد، افزایش یافته و سپس با افزایش مقدار امولسیون قیر از ۲ تا ۶ درصد، کاهش یافته است.

می‌دهند که افزایش درصد سیمان به طور میانگین باعث ۸۶/۳ درصد افزایش در مقاومت مارشال می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین میزان افزایش زمانی است که از ۲ درصد امولسیون قیر و در مقابل، کمترین میزان آن زمانی است که از ۴/۲۵ درصد



-----	میزان کاهش برای آزمایش پراکتور: $W_{OFC} > 2(\%mass); W_{Reduc.} = (0.4 \times W_{OFC}) - 0.8$
—————	میزان کاهش برای آزمایش پراکتور اصلاح شده: $W_{OFC} > 2(\%mass); W_{Reduc.} = (0.3 \times W_{OFC}) - 0.6$

شکل ۳. منحنی میزان کاهش در مقابل رطوبت بهینه (درصد جرمی) [۵]

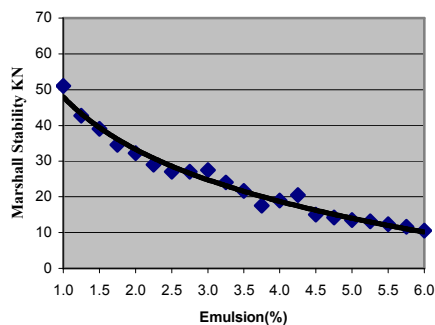


-----	منحنی تغییرات امولسیون
—————	منحنی تغییرات سیمان

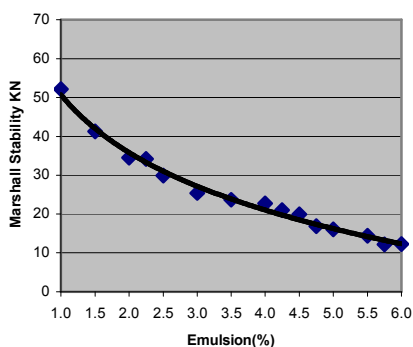
شکل ۴. نمودار تعیین درصد‌های بهینه سیمان و امولسیون قیر برای مقاومت مارشال مورد نظر

$$\bar{x}(t+1) = \bar{x}(t) - \alpha \frac{f-y}{b} (\bar{y}(t) - f) z^l \frac{2(x_i - \bar{x}^l(t))}{\sigma_i^2(t)} \quad (9)$$

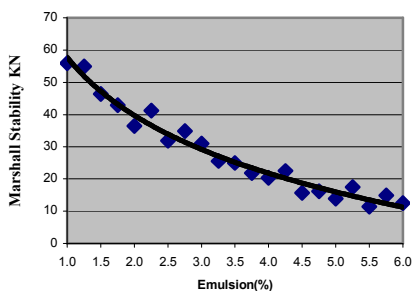
$$\bar{x}(t+1) = \bar{x}(t) - \alpha \frac{f-b}{b} \bar{y}^l \left[\prod \frac{x_i - \bar{x}^l}{\sigma^2} \right] \frac{1-x_i}{\sigma^2} \exp\left(\frac{x_i - \bar{x}^l}{\sigma}\right)^2 \quad (10)$$



شکل ۵ (الف). نمودار تغییرات مقاومت مارشال برحسب درصد امولسیون قیر (۱ درصد سیمان)



شکل ۵ (ب). نمودار تغییرات مقاومت مارشال برحسب درصد امولسیون قیر (۱/۲۵ درصد سیمان)



شکل ۵ (ج). نمودار تغییرات مقاومت مارشال برحسب درصد امولسیون قیر (۱/۵ درصد سیمان)

۸ مدل سازی آزمایش مارشال توسط شبکه عصبی - فازی

در این مدل‌سازی از شبکه عصبی - فازی با موتور استنتاج ممدانی استفاده شده است [۱۱]. ورودی‌های شبکه، درصد امولسیون قیر و درصد سیمان مصرفی برای ساختن نمونه‌های مارشال و خروجی شبکه مقاومت مارشال نمونه است. نتایج آزمایشها نشان می‌دهند که تغییرات امولسیون قیر در مقاومت مارشال، تأثیر بیشتری نسبت به تغییرات سیمان دارد، بنابراین در شبکه عصبی - فازی طراحی شده برای امولسیون قیر، شش تابع عضویت ورودی و برای سیمان، سه تابع عضویت ورودی در نظر گرفته شد (توابع عضویت ورودی به صورت توابع گوسی در نظر گرفته شده‌اند). با این عمل شبکه عصبی - فازی در مقابل تغییرات امولسیون قیر حساسیت بیشتری از خود نشان می‌دهد. ساختار شبکه عصبی - فازی ارایه شده، در شکل ۹ نشان داده شده است.

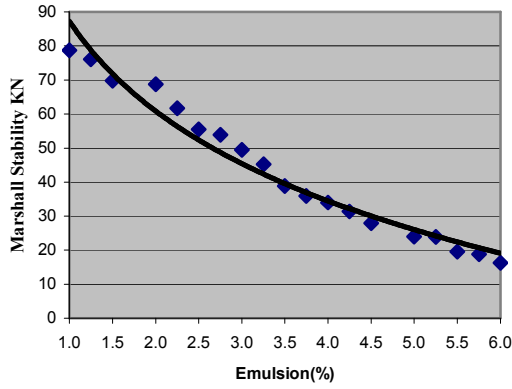
در ساختار ارایه شده در شکل ۹، \bar{Y}^l مراکز میانگین توابع خروجی و \bar{X}_i مراکز میانگین توابع ورودی هستند. فازی ساز پیشنهادی برای این شبکه، فازی ساز منفرد است. غیر فازی ساز استفاده شده، غیر فازی ساز میانگین مراکز در نظر گرفته شده است. بنابراین رابطه (۷) نشان دهنده خروجی شبکه عصبی - فازی شکل ۹ خواهد بود.

در رابطه (۷)، n برابر تعداد ورودی (در این تحقیق ۲)، M برابر تعداد قواعد پایگاه قواعد است (در این تحقیق ۱۸) و σ انحراف معیار توابع تعلق هستند. در این حال نمونه‌ها تک تک وارد شبکه و آموزش داده شده‌اند. برای آموزش پارامترهای میانگین مراکز مجموعه‌های فازی خروجی و ورودی شبکه عصبی - فازی از گرادیان نزولی و از روابط (۸) تا (۱۰) استفاده شده است [۱۱].

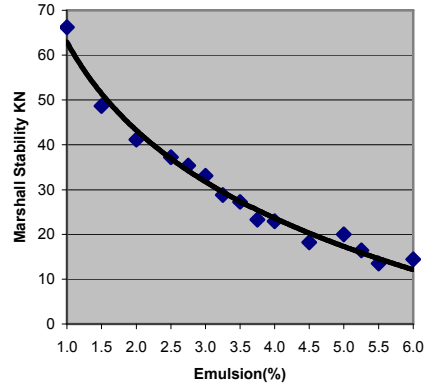
در روابط (۸) تا (۱۰)، f مقدار خروجی شبکه، α نرخ آموزش، z^l قوانین به دست آمده و b مجموع z^l ها هستند

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left[\prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) \right]}{\sum_{l=1}^M \left[\prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) \right]} \quad (7)$$

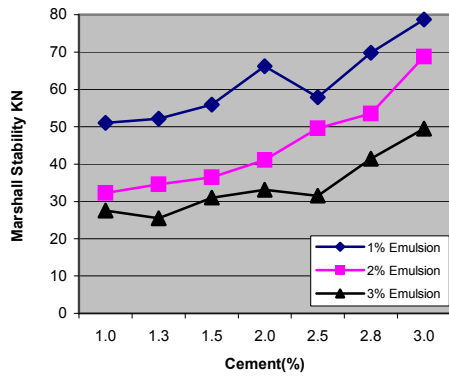
$$\bar{y}_{t+1}^l = \bar{y}_t^l - \alpha \frac{f-y}{b} z^l \quad (8)$$



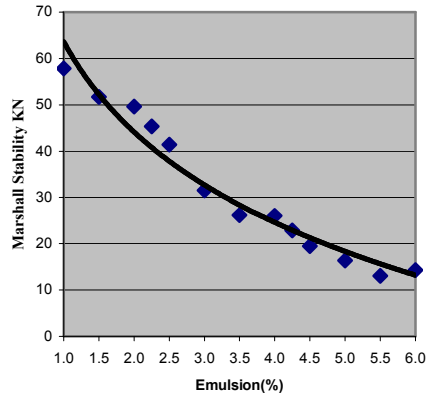
شکل ۵ (ز). نمودار تغییرات مقاومت مارشال برحسب درصد امولسیون قیر (۳ درصد سیمان)



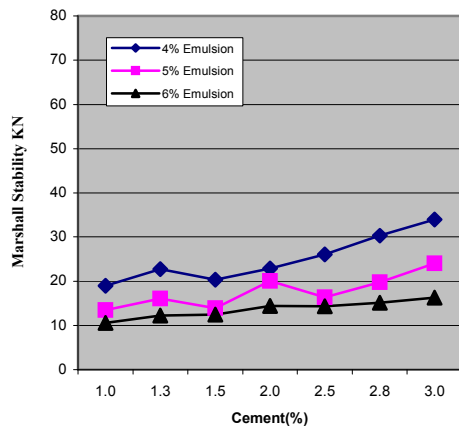
شکل ۵ (د). نمودار تغییرات مقاومت مارشال برحسب درصد امولسیون قیر (۲ درصد سیمان)



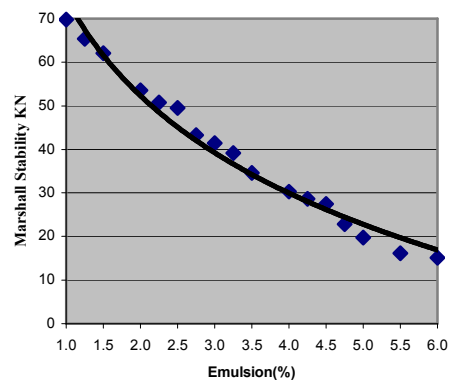
شکل ۶ (الف). نمودار تغییرات مقاومت مارشال برحسب درصد سیمان (برای ۱، ۲ و ۳ درصد امولسیون قیر)



شکل ۵ (ه). نمودار تغییرات مقاومت مارشال برحسب درصد امولسیون قیر (۲/۵ درصد سیمان)



شکل ۶ (ب). نمودار تغییرات مقاومت مارشال برحسب درصد سیمان (برای ۴، ۵ و ۶ درصد امولسیون قیر)



شکل ۵ (و). نمودار تغییرات مقاومت مارشال برحسب درصد امولسیون قیر (۲/۷۵ درصد سیمان)

۹. الگوریتم ژنتیک

روش‌های جستجو، جزو روش‌های توسعه یافته در شاخه هوش مصنوعی و از تکامل یافته‌ترین روش‌های بهینه‌سازی برگرفته از وراثت جانداران است. این الگوریتم‌ها بر اساس تکامل طبیعی پایه‌ریزی شده‌اند. الگوریتم‌های ژنتیکی، روشی قدرتمند و با کاربرد وسیع در جستجوهای احتمالی هستند. مدل معمول الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۸۹ توسط گلدبرگ^{۱۲} ارائه شد [۱۲]، [۱۳]. الگوریتم ژنتیک بر خلاف روشهای جستجوی مرسوم با یک مجموعه اولیه از جواب‌های اختیاری که جمعیت نامیده می‌شوند شروع می‌شود. هر فرد در جمعیت، یک کروموزوم^{۱۳} نامیده می‌شود که یک جواب بالقوه از مسئله مورد نظر است. کروموزم‌ها رشته‌های بیتی (دودویی) هستند که در طی تکرارهای متوالی تکمیل شده و نسل‌ها را تشکیل می‌دهند [۱۴].

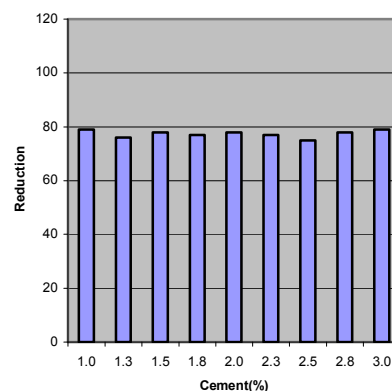
در طی هر تولید، کروموزم‌ها با استفاده از بعضی مقیاس‌های برازندگی ارزیابی می‌شوند. برای ایجاد نسل‌های بعدی، کروموزم‌های جدید (که فرزندان نامیده می‌شوند) با ترکیب شدن دو کروموزم برازنده‌تر (با درجه برازندگی بیشتر) از نسل موجود با استفاده از عمل برش^{۱۴} و نیز اصلاح کروموزم‌ها توسط عملگر جهش^{۱۵} به وجود می‌آیند [۱۵]. پس از چندین تولید نسل توسط الگوریتم، بهترین کروموزم‌ها همگرا می‌شوند که به‌طور امید بخشی جواب بهینه مسئله است.

۱۰. بهینه‌سازی هزینه ساخت توسط روش

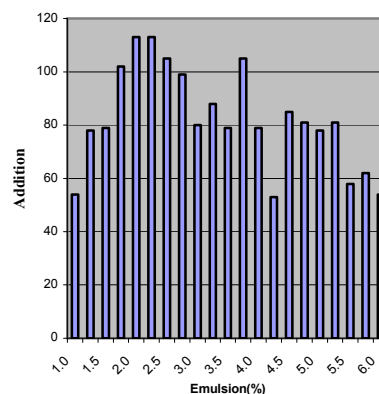
بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

برای بهینه‌سازی اقتصادی تثبیت مصالح با سیمان و امولسیون قیر از معیار مقاومت مارشال و از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این راستا قیمت هر کیلو سیمان برابر P_c واحد و قیمت هر کیلو امولسیون قیر برابر P_E واحد در نظر گرفته شده است.

کروموزم‌ها به صورت رشته‌های بیتی در نظر گرفته شده‌اند که هر کروموزم از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول معرف درصد سیمان مصرفی و بخش دوم معرف درصد امولسیون قیر مصرفی است که هر بخش از تعدادی بیت تشکیل شده‌اند (هر بیت معرف یک ژن است). با ارایه رابطه (۱۱) و با توجه به بازه ورودی‌ها، تعداد بیت‌های هر بخش از این رابطه محاسبه شده‌اند.



شکل ۷. نمودار درصد کاهش مقاومت مارشال به علت استفاده از امولسیون قیر برحسب درصدهای سیمان مختلف



شکل ۸. نمودار درصد افزایش مقاومت مارشال به علت استفاده از سیمان برحسب درصدهای امولسیون قیر مختلف

پس از آموزش شبکه عصبی- فازی، برای ۱۲۰ نمونه از ۱۷۰ نمونه موجود، شبکه‌ای در اختیار است که نمایانگر مدل ریاضی مقاومت مارشال با دو ورودی درصد امولسیون قیر و درصد سیمان است. نمودار خروجی این شبکه پس از آموزش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. میانگین خطای شبکه عصبی- فازی آموزش دیده، به ازای نمونه‌های آموزش داده شده، ۱/۵٪ و به ازای نمونه‌های آزمایش ۲/۵٪ بوده که خطای قابل قبولی برای این طرح می‌باشد (بیشینه خطای قابل قبول ۳ درصد است [۴]). شکل ۱۱، خروجی مطلوب^{۱۱} و خروجی شبکه (به ازای نمونه‌های آزمایش) را نشان می‌دهد که در آن نموداری که به صورت خط توپر نشان داده شده، خروجی مطلوب و نموداری که بصورت نقاط گسسته نشان داده شده است، خروجی شبکه عصبی- فازی هستند.

د. از میان کروموزم‌های جمعیت اولیه، ۱۵۰ بار کروموزمی تصادفی انتخاب شده، به نحوی که احتمال انتخاب کروموزم برانده‌تر بیشتر باشد، سپس هر کروموزم تحت عمل جهش قرار گرفته و کروموزمی جدید ساخته شده است (۱۵۰ کروموزوم جدید).

ک. درجهٔ برانندگی کلیه ۲۰۰ کروموزم فرزند ساخته شده از گام‌های ج و د، توسط تابع برانندگی رابطه (۱۲) مشخص شده است.

ل. از میان ۲۰۰ کروموزم فرزند، ۱۰۰ کروموزم که دارای بیشترین درجهٔ برانندگی بوده‌اند انتخاب و جایگزین کروموزم‌های جمعیت اولیه شده‌اند.

م. مادامی که کروموزمی با درجه برانندگی دلخواه حاصل نشود، ادامهٔ الگوریتم از گام ج پیگیری می‌شود.

الگوریتم بالا به ازای $D_m = 40000$ اجرا شد و پس از ۲۵۰۰ بار تکرار^{۱۶} مقدار سیمان و قیر امولسیون بهینه با فرض $P_C = 500$ و $P_E = 1000$ (مقادیری نزدیک به واقعیت) محاسبه شدند. مقدار درصد سیمان و امولسیون قیر مورد نیاز به ترتیب $1/850$ و $2/160$ درصد به دست آمد. یعنی این که برای تثبیت خاک و زیرسازی جاده ای با امولسیون قیر و سیمان با مقاومت مارشال مورد نیاز 40000 نیوتن، اقتصادی‌ترین ترکیب ممکن، استفاده از $1/850$ درصد وزنی سیمان و $2/160$ درصد وزنی قیر امولسیون است. برای درک بهتر اهمیت بهینه‌سازی میزان امولسیون قیر و سیمان مورد نیاز به روش الگوریتم ژنتیک و میزان صرفه‌جویی هزینه‌ها، مثالی به شرح ذیل بیان می‌شود:

در صورتی که آزادراهی به عرض اجرایی ۳۶ متر مفروض بوده و برای اجرای فقط یک لایه ۲۰ سانتیمتری تثبیت خاک با امولسیون قیر و سیمان بتوان در مصرف سیمان و امولسیون قیر هر کدام یک درصد صرفه جویی کرد، در مجموع با در نظر گرفتن وزن مخصوص متوسط ۲۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌توان برای هر یک از امولسیون قیر و سیمان حدود ۱۶۵ تن در هر کیلومتر راه صرفه جویی کرد. این رقم برای جاده های با طول زیاد، بسیار کلان بوده و هزینه‌ها، میلیاردها ریال کاهش می‌یابد.

۱.۱ نتیجه گیری

در تحقیق حاضر مقاومت نمونه های تثبیت شده با امولسیون قیر و سیمان با استفاده از نرم افزار MATLAB مدل سازی

$$N_E = \left[\log_2 \left((H_E - L_E) \times 10^p \right) \right] \quad (11)$$

$$N_C = \left[\log_2 \left((H_C - L_C) \times 10^p \right) \right]$$

در رابطه (۱۱)، H_C و L_C به ترتیب مرز بالا و پایین بازهٔ درصد سیمان مصرفی هستند که در این محاسبه سیمان مصرفی در بازهٔ (۳، ۱) درصد قرار گرفته اند، بنابراین $H_C = 3$ و $L_C = 1$ هستند. همچنین H_E و L_E به ترتیب مرز بالا و پایین بازهٔ درصد امولسیون قیر مصرفی هستند که در این محاسبه امولسیون قیر مصرفی در بازهٔ (۶، ۱) درصد قرار می‌گیرند. دقت محاسباتی الگوریتم است که برای مثال به ازای $p = 2$ تا دو رقم (یک صدم) دقت در نظر گرفته شده است و N_C و N_E تعداد بیت‌های لازم برای دو ورودی سیمان و امولسیون قیر هستند. در نهایت الگوریتم ژنتیک بکار گرفته شده به شرح ذیل پیاده شده است:

الف. تعداد ۱۰۰ کروموزم به‌صورت تصادفی مقدار دهی شده و به عنوان جمعیت اولیه در نظر گرفته شده است.

ب. درجهٔ برانندگی هر کروموزم توسط تابع برانندگی و رابطه (۱۲) ارایه شده توسط مؤلفین تعیین شده است.

(۱۲)

$$f(C, E) = \frac{1}{C \times P_C + E \times P_E} + \frac{1}{|f_{mf}(C, E) - D_m|}$$

در رابطه (۱۲)، C درصد سیمان مصرفی است که از بخش اول کروموزم استخراج می‌شود و E درصد امولسیون قیر مصرفی است که از بخش دوم کروموزم استخراج می‌شود. $f_{mf}(C, E)$ تابع شبکه عصبی - فازی آموزش دیده است که در ازای ورودی‌های سیمان و امولسیون قیر، مقاومت مارشال را برآورد می‌کند. D_m نیز مقدار مقاومت مارشال مورد نظر برای تثبیت خاک با سیمان و امولسیون قیر است. در رابطه (۱۲) ارایه شده توسط مؤلفین، جمله اول نشانگر هزینه‌های سیمان و امولسیون قیر و جمله دوم نشانگر نزدیکی به مقاومت مارشال مورد نظر است. به این ترتیب کروموزمی که دارای قیمت کمتر و مقاومت مارشالی که به مقاومت مارشال مورد نظر نزدیک‌تر باشد، درجهٔ برانندگی بیشتری دریافت می‌کند.

ج. از میان کروموزم‌های جمعیت اولیه، ۵۰ بار دو کروموزم تصادفی به‌نحوی انتخاب شده‌اند که احتمال انتخاب کروموزم برانده‌تر، بیشتر باشد. کروموزم‌ها با هم عمل برش را انجام داده و ۵۰ کروموزم جدید (فرزندان)، ساخته شده است.

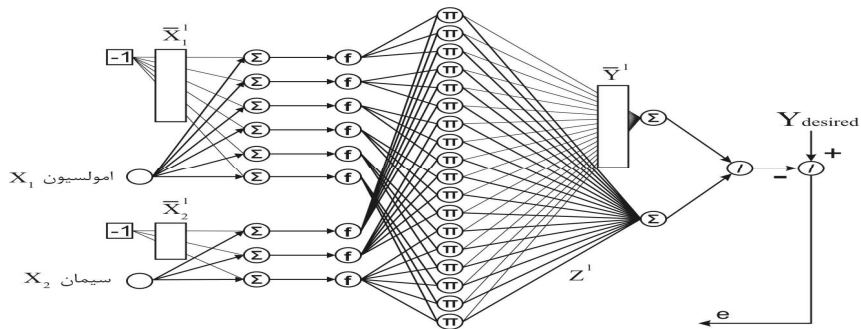
شبکه عصبی - فازی و بهینه‌یابی هزینه‌ها توسط الگوریتم ژنتیک...

- ۲ - مدل شبکه عصبی - فازی ابزاری مناسب برای مدل سازی و تخمین مسائل طبیعی است.
- ۳ - مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک ارایه شده قادر است هزینه‌های اجرایی تثبیت خاک با سیمان و امولسیون قیر را بهینه کرده و در نتیجه هزینه‌های کل پروژه‌های راهسازی را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد.
- ۴ - نمودار ارایه شده مقاومت مارشال - درصد سیمان و امولسیون قیر قادر است در مقابل مقاومت مارشال مورد نیاز درصدهای سیمان و امولسیون قیر بهینه را تعیین کند.

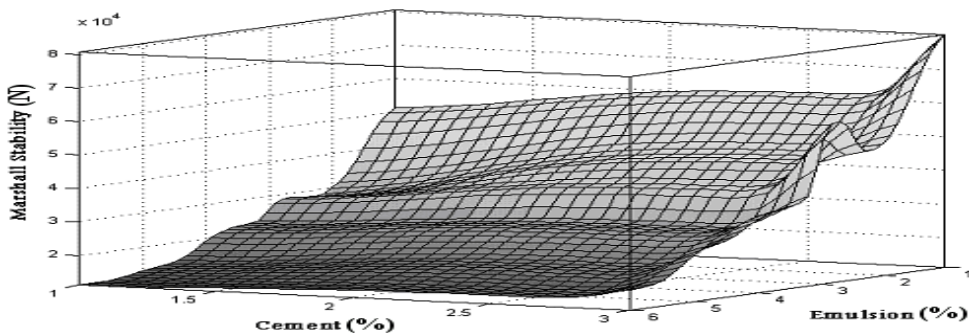
شده است. مدل حاصل از انجام ۱۷۰ آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های تثبیت شده و آموزش شبکه عصبی - فازی به دست آمده است. همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک، طریقه بهینه‌یابی هزینه‌های اجرایی راهسازی ارایه شده است.

نتایج حاصل به شرح زیر خلاصه می شود:

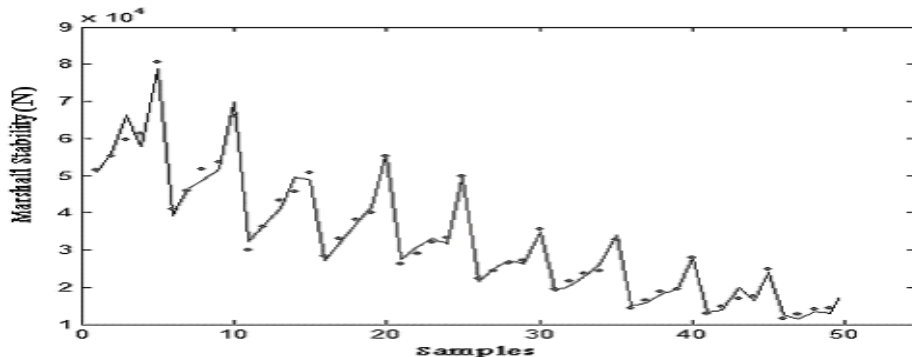
- ۱ - مدل شبکه عصبی - فازی ارایه شده قادر است با درصد خطای قابل قبول (کمتر از ۳ درصد مجاز) مقاومت مارشال نمونه‌های تثبیت شده با امولسیون قیر و سیمان را تعیین کرده و مابین درصدهای سیمان و امولسیون قیر مصرفی رابطه منطقی برقرار کند.



شکل ۹. ساختار شبکه عصبی - فازی پیشنهادی با دو ورودی و یک خروجی



شکل ۱۰. خروجی شبکه عصبی - فازی آموزش دیده



-----	خروجی شبکه عصبی - فازی آموزش دیده
—————	خروجی مطلوب

شکل ۱۱. نمودار مقایسه خروجی مطلوب و خروجی شبکه عصبی - فازی آموزش دیده، به ازای داده‌های آزمایش

۱۰. ایران. وزارت راه و ترابری. مؤسسه قیر و آسفالت (۱۳۸۳) "مشخصات فنی - اجرائی بازیافت سرد آسفالت"، مؤسسه قیر و آسفالت ایران، وزارت راه و ترابری.
11. Wang, Lie-Xin (1997) "A course in fuzzy system and control", London: Prentice-Hall.
12. Mitsuo, Gen and Runwei, Sheng (1997) "Genetic algorithms and engineering design", Wiley Series in Engineering Design and Automation, pp. 76-130.
13. Goldberg, D. (1989) "Genetic algorithms in search optimization and machine learning", Reading, Addison-Wesley.
14. Fogel, D. and Ghozeil, A. (1996) "Using fitness distributions to design more efficient evolutionary computations", Nagoya, Japan :EEE Press.
15. Michalewicz, Z. (1994) "Genetic algorithm plus data structure equal to evolution programs", 2nd edition, Springer-Verlag, New York.
1. Kent, Newman & Jeb, S. Tingle(2004) "Emulsion polymers for soil stabilization", FAA World Wide Airport Technology Transfer Conference Atlantic City, USA.
2. Marandi, Seyed Morteza, Nievelt, Helmut and Weinert, Frank (2004) "International Airport Tehran- Erneuerung einer Start-und Landebahn, Anwendung von Kaltrecycling-Technologien mit Schaumbitumen, Bitumen Journal, 66 Jahrgang – 2. Quartal . C20238, pp. 58-62, February.
3. Hicks, R. Gary (2002) "Alaska soil stabilization design guide" Oregon: U.S. Department of Civil Engineering, Oregon State University.
4. Wirtgen, (2004) "Recycling manual, 2nd Edition", Germany, n.p.
5. Wirtgen, (2002) "Road construction manual", Windhagen, Germany.
- 6., State of Alaska, Department of Transportation and Public Facilities (2002) "Alaska soil stabilization design guide research and technology transfer", Fairbank. USA.
7. Jang, J., Sun, C. and Mizutani, E., "Neuro-fuzzy and soft computing", London: Prentice-Hall, 1997.
8. Cox, E. (1994) "The fuzzy systems handbook", Academic Press, MA.
9. Ishikawa, M. (1996) "Rule extraction by successive regularization", IEEE Proc. of ICNN.

پانویس ها

1. Marshall Stability
2. Rapid setting
3. Medium setting
4. Slow setting
5. Aeration
6. Neuro -fuzzy
۷. محدوده منحنی دانه بندی توسط انجمن قیر آفریقای جنوبی برای تثبیت خاک با امولسیون قیر پیشنهاد شده است.
8. Universal testing set
9. Desired output
10. Goldberg
11. Chromosome
12. Cross-over
13. Mutation
14. Iteration

شبکه عصبی - فازی و بهینه‌یابی هزینه‌ها توسط الگوریتم ژنتیک...

مرندی، صفاپور، باقری پور و قاسمی