

## برآورد ضریب انتشارپذیری کلر در بتن به روش شبکه عصبی فازی

فتح ... محمودزاده<sup>۱</sup>، حسین تقدس<sup>۱</sup>، محمدشکرچی زاده<sup>۲</sup>،  
اسدا... نورزاد<sup>۲</sup>، انوشیروان انصاری<sup>۳</sup>

دانشگاه تهران

[mahmodzad@ut.ac.ir](mailto:mahmodzad@ut.ac.ir)

### چکیده

تعیین ضریب انتشارپذیری نفوذ یون کلر در بتن یکی از مسائل مهم برای برآورد عمر مفید سازه های بتنی در منطقه خلیج فارس می باشد. این ضریب به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که تاکنون به دلیل تعداد زیاد پارامترها و کم بودن داده ها معمولاً فقط اثر یک و یا دو پارامتر را در نظر گرفته شده است. از آنجائی که بدست آوردن داده های آزمایشگاهی مشکل است، در این مقاله در ابتدا با توجه به فیزیک مساله و با توجه به کم بودن داده ها سه روش معمول بررسی گردیده که با تعداد داده ها متناسب نبودند. آنگاه یکی از این روشها اصلاح شده و با استفاده از آن شبکه عصبی فازی آموزش داده شده و جوابهای قابل قبولی بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: بتن - شبکه عصبی فازی - ضریب انتشارپذیری - نفوذ یون کلر - مدل سوگنو

### مقدمه

استفاده از شبکه عصبی و مباحث فازی در دهه اخیر در گرایشهای مختلف از جمله مهندسی عمران توسعه پیدا کرده است [۱ و ۲]. استفاده از این روش شبکه عصبی فازی (Neuro Fuzzy Network) جهت پردازش داده‌ها در کارهای آزمایشگاهی روش کارآمد و مؤثری است [۳ و ۴]. ولی این سیستم به ندرت در تکنولوژی بتن مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق از سیستم شبکه عصبی فازی برای تخمین ضریب انتشار پذیری بتن (Diffusion Coefficient) استفاده شده است، که این پارامتر در کمی کردن پدیده نفوذ یون کلر در بتن نقش اساسی ایفاء می کند و با مشخص کردن این پارامتر به کمک حل معادله درجه دوم فیک (Fick) می‌توان عمر مفید سازه‌های بتنی را پیش‌بینی کرد. این پارامتر به عوامل متعددی بستگی دارد که بطور معمول تأثیر هر یک از این عوامل بر روی ضریب انتشارپذیری بطور جداگانه در نظر گرفته می‌شود. با توجه به پرهزینه بودن بدست آوردن اطلاعات آزمایشگاهی در این زمینه و کمبود داده‌ها، روشهای معمول برازش

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران

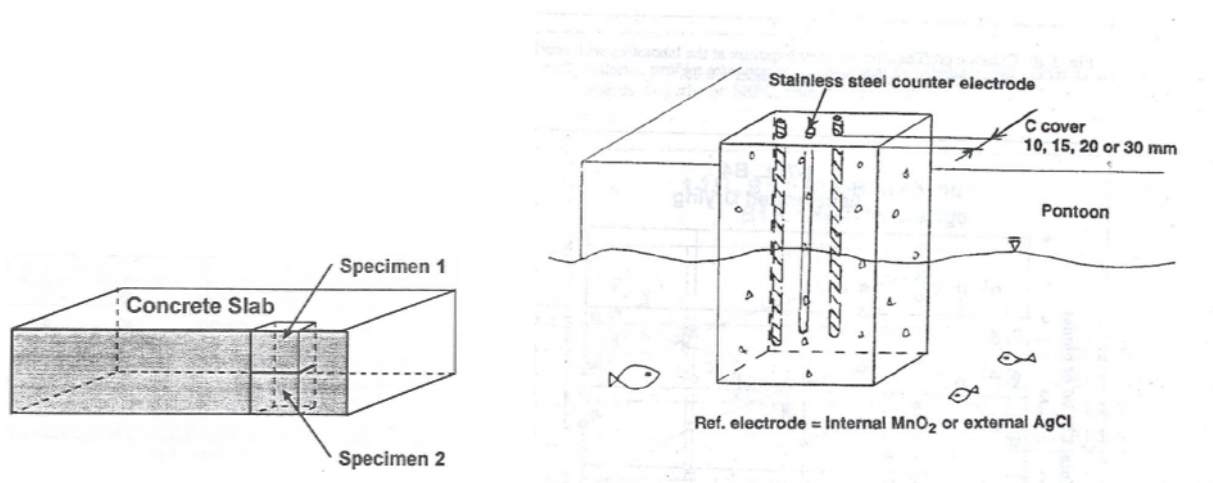
۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران

تابع جواب مناسبی را نخواهند داد. از این رو در تحقیق حاضر از سیستم شبکه عصبی فازی اصلاح شده استفاده نموده و جواب مناسب بدست آمده است.

## ۱- مدل آزمایشگاهی

### ۱-۱- دال های بتنی

داده‌های مبنای مورد نیاز در این تحقیق از گزارش‌های گروه مصالح ساختمانی دانشگاه چالمرز در کشور سوئد (Department of Building Materials, Chalmers University of Technology) [5] و با همکاری چند انستیتو دیگر نظیر لانگ (Lung Institute) تهیه شده است. بدین ترتیب که ۲۴ نمونه آزمایشگاهی با طرح اختلاهای مختلف در ابعاد  $100 \times 700 \times 100$  میلیمتر، در تراسلوسلگ (Traslovsloge) در غرب سوئد ساخته شده (جدول ۱) و به مدت حدود ۲ هفته عمل آوری شدند. سپس دال ها به سایت تراسلوسلگ منتقل شدند و در لبه یک سکوی شناور مانند شکل ۱ نصب شدند به صورتیکه انتهای نمونه های بتنی همواره در آب قرار داشتند. در این سایت میزان یون کلر در دریا حدود ۱۰ الی ۱۸ گرم کلر در هر لیتر میباشد.



شکل ۱- نصب دال در لبه یک سکوی شناور شکل

شکل ۲- طریقه بریدن نمونه ها

### ۱-۲- نمونه گیری

بعد از شش ماه نگهداری نمونه در آب دریا نمونه ها به آزمایشگاه برگردانده شدند و از هر دال ۳۰ الی ۵۰ میلیمتر بریده شد تا بتوان فرض کرد که نفوذ کلر در بتن به صورت یک بعدی انجام شده است. سپس یک منشور  $100 \times 100 \times 100$  میلیمتر از قسمت های مختلف نمونه ها بریده شده و نمونه ها دوباره به سایت منتقل شدند. آنگاه مغزه گیری برای هر نمونه و خرد کردن نمونه ها در اعماق مختلف بتن بوسیله دستگاه نمونه گیری انجام شد.

### ۱-۳- تعیین میزان ضریب انتشار پذیری

برای اندازه گیری ضریب انتشارپذیری بتن، دو نمونه مطابق شکل ۲ بریده شده و بدنه آنها در معرض یون کلر قرار گرفتند. بدین جهت از قسمت داخلی نمونه سیلندری برای تعیین پروفیل یون کلر استفاده شد. میانگین نتایج در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- طرح اختلاط نمونه های آزمایشگاهی در سایت تراسلوسلگ (Traslovslage) و نتایج مربوط به ضریب انتشارپذیری بتن بعد از شش ماه [5]

| کد نمونه | نوع سیمان (CT) | درصد دوده سیلیس (SF) | عیار سیمان (C)       | نسبت آب به مواد سیمانی | درصد هوا (A) | ضریب انتشارپذیری بتن (D)                 |
|----------|----------------|----------------------|----------------------|------------------------|--------------|--|
|          |                | %                    | (kg/m <sup>3</sup> ) | (W/C)                  | %            | *10 <sup>^(-12)</sup> m <sup>^2</sup> /s |
| 1-35     | 1 <sup>1</sup> | 0                    | 450                  | 0.35                   | 6            | 6.90                                     |
| 1-40     | 1              | 0                    | 420                  | 0.40                   | 6.2          | 12.15                                    |
| 1-50     | 1              | 0                    | 370                  | 0.50                   | 6.4          | 19.92                                    |
| 1-75     | 1              | 0                    | 240                  | 0.75                   | 6.1          | 87.62                                    |
| 2-35     | 2 <sup>2</sup> | 0                    | 450                  | 0.35                   | 5.7          | 3.56                                     |
| 2-40     | 2              | 0                    | 420                  | 0.40                   | 6.25         | 7.05                                     |
| 2-50     | 2              | 0                    | 390                  | 0.50                   | 5.8          | 18.21                                    |
| 2-60     | 2              | 0                    | 310                  | 0.60                   | 6.3          | 31.76                                    |
| 2-75     | 2              | 0                    | 250                  | 0.75                   | 5.8          | 49.43                                    |
| 3-35     | 1              | 5                    | 450                  | 0.35                   | 5.8          | 2.93                                     |
| 3-40     | 1              | 5                    | 420                  | 0.40                   | 6.1          | 4.43                                     |
| 3-50     | 1              | 5                    | 370                  | 0.50                   | 6            | 13.40                                    |
| 3-75     | 1              | 5                    | 240                  | 0.75                   | 5.9          | 33.87                                    |
| 4-40     | 1              | 10                   | 420                  | 0.40                   | 6.6          | 3.22                                     |
| 5-40     | 1              | 5                    | 420                  | 0.40                   | 2.9          | 3.85                                     |
| 6-35     | 1              | 5                    | 450                  | 0.35                   | 2.1          | 1.63                                     |
| 6-40     | 1              | 5                    | 420                  | 0.40                   | 1.7          | 4.03                                     |
| 7-35     | 1              | 0                    | 450                  | 0.35                   | 2.4          | 4.33                                     |
| 7-40     | 1              | 0                    | 420                  | 0.40                   | 2.1          | 6.48                                     |
| 7-75     | 1              | 0                    | 265                  | 0.75                   | 1.1          | 38.18                                    |
| 8-35     | 2              | 0                    | 470                  | 0.35                   | 2.1          | 5.35                                     |
| 8-40     | 2              | 0                    | 440                  | 0.40                   | 2.1          | 7.26                                     |
| 8-50     | 2              | 0                    | 410                  | 0.50                   | 1.4          | 16.03                                    |
| 8-60     | 2              | 0                    | 330                  | 0.60                   | 1.6          | 25.26                                    |
| 8-75     | 2              | 0                    | 270                  | 0.75                   | 1.4          | 38.52                                    |

۱- SRPC سیمان مقاوم در برابر حملات سولفاتی

۲- OPC سیمان پرتلند معمولی

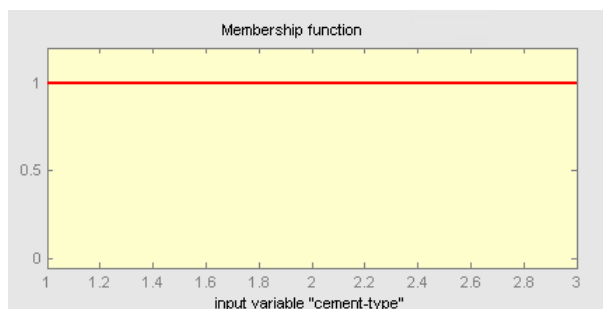
## ۲- مدل فازی

۱-۲- انتخاب تعداد عبارت زبانی برای هر بعد

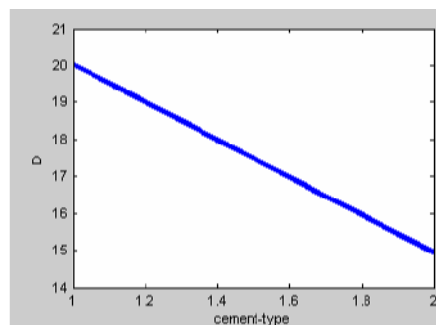
پارامترهای مستقل در نظر گرفته شده در این مدل عبارتند از: نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)، نوع سیمان (CT)، درصد دوده سیلیس (SF)، عیار سیمان (C) و درصد هوا (A).

تابع عضویت نوع سیمان (CT)

به دلیل کم بودن تغییرات نوع سیمان در این تحقیق (فقط دو نقطه)، فرض میکنیم تغییرات در این فضا خطی باشد) شکل ۳).



شکل ۴- تابع عضویت نوع سیمان (ثابت)



شکل ۳- رابطه نوع سیمان و ضریب انتشار پذیری D (خطی)

برای خطی بودن ضریب انتشار پذیری باید داشته باشیم:

$$\frac{\partial D^*}{\partial x_i} = Cte \quad (1)$$

و طبق روابط زیر داریم:

$$D^* = \bar{W}_r \times D_r \quad \text{و} \quad D_r = P_{ri} \times x_i \quad (2)$$

D مقدار واقعی، ( $D^*$ ) خروجی شبکه و  $D_r$  و  $\bar{W}_r$  به ترتیب خروجی و وزن هر قانون می باشند. بر این اساس داریم:

$$\frac{\partial D^*}{\partial x_i} = \frac{\partial D^*}{\partial D_r} \cdot \frac{\partial D_r}{\partial x_i} + \frac{\partial D^*}{\partial \bar{W}_r} \cdot \frac{\partial \bar{W}_r}{\partial W_r} \cdot \frac{\partial W_r}{\partial \mu_{jr}} \cdot \frac{\partial \mu_{jr}}{\partial x_i} = \frac{\partial D^*}{\partial D_r} \cdot P_{ri} + \frac{\partial D^*}{\partial \bar{W}_r} \cdot \frac{\partial \bar{W}_r}{\partial W_r} \cdot \frac{\partial W_r}{\partial \mu_{jr}} \cdot \frac{\partial \mu_{jr}}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \mu_{jr}}{\partial x_i} = 0 \quad \Rightarrow \quad \mu_{jr} = Cte \quad (4)$$

بنابراین برای خطی بودن ضریب انتشار پذیری نسبت به یک پارامتر باید تابع عضویت آن پارامتر ثابت باشد. بنابراین تابع عضویت نوع سیمان ( $\mu_{CT}$ ) را ثابت در نظر میگیریم (شکل ۴).

#### تابع عضویت در صد دوده سیلیس (SF) و درصد هوا (A)

برای بعد مربوط به درصد دوده سیلیس فقط سه نقطه (۰، ۵، ۱۰) داریم و با توجه به اهمیت درجه دوم در صد دوده سیلیس و درصد هوا نسبت به عیارسیمان و نسبت آب به مواد سیمانی، در این دو فضا نیز تغییرات را خطی در نظر می گیریم. به این ترتیب تابع عضویت آنها باید ثابت باشد ( $\mu_A = Cte$  و  $\mu_{SF} = Cte$ ).

#### تابع عضویت عیارسیمان و نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)

با توجه به اهمیت تعیین کننده عیار سیمان و نسبت آب به مواد سیمانی دو حالت را در نظر می گیریم:

الف) دوبرچسب زبانی بالا (High) و پایین (Low) برای هر یک و استفاده از تابع گوس دو پارامتره به عنوان تابع عضویت:

$$\mu = \exp\left(-\left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^2\right) \quad (5)$$

ب) دوبرچسب زبانی بالا (High) و پایین (Low) برای نسبت آب به مواد سیمانی و تابع عضویت گوس دو پارامتره و یک برچسب زبانی برای عیار سیمان ( $\mu_{Ct} = Cte$ ).

## ۲-۲- انتخاب مدل

در مطالعه حاضر دو روش معمول در شبکه عصبی فازی بررسی گردیده که با توجه به کم بودن داده ها این روش ها مناسب نبوده و نهایتاً یکی از این دو روش اصلاح شده و مورد استفاده قرار گرفت.

### الف) تعلیم مدل سوگنو درجه یک

مدل در حالت اول با فرض یک عبارت زبانی برای نوع سیمان و درصد دوده سیلیس و دو عبارت زبانی برای عیار سیمان و نسبت آب به مواد سیمانی و احتساب یک قانون برای هر حالت ترکیب ممکن ساخته میشود و نتیجتاً ۴ قانون با وزن یک بدست میآید که هر یک در حکم قانون یکتای فازی و بیانگر ضریب انتشار پذیری بتن است.

با توجه به فرضیات بالا تعداد پارامترهای غیرخطی (با فرض استفاده از تابع گوس (دو پارامتره)) عبارتند از:

$$N_{\text{nonlinear parameters}} = N_{CT} + N_{SF} + N_C + N_{W/C} + N_A = 14 \quad (6)$$

با توجه به تقسیم بندی بالا تعداد پارامترهای خطی (با فرض سوگنو درجه ۱ و تقسیم بندی منظم) عبارتند از:

$$\text{Rules\_number} = \prod_i^{\text{dim}_{\text{input}}} N_{\text{number of gird input } i} = 4 \quad (7)$$

$$N_{\text{linear parameters}} = \text{Rules\_number} \times (1 + \text{dim}_{\text{input}}) = 24 \quad (8)$$

$$N_{\text{parameters}} = 38 > \text{Data\_number} = 24 \quad (9)$$

با در نظر گرفتن حداقل تقسیم بندی، باز هم تعداد پارامترها بیشتر از مجهولات شده است و قابل قبول نیست.

برای کاهش تعداد پارامترها نسبت آب به مواد سیمانی و یا عیار سیمان را خطی در نظر میگیریم در این حالت داریم:

$$N_{\text{nonlinear parameters}} = 12 \quad \text{و} \quad N_{\text{linear parameters}} = 12 \quad (10)$$

$$N_{\text{parameters}} = 24 = \text{Data\_number} = 24 \quad (11)$$

در صورت استفاده از این مدل داده ای برای کنترل خروجی شبکه وجود ندارد و لذا این روش نیز قابل اطمینان نیست.

### ب) تعلیم مدل سوگنو درجه صفر

در این روش برای کاهش تعداد پارامترهای خطی از مدل سوگنو درجه صفر استفاده می کنیم. در این حالت برای ثابت

نشدن رابطه ضریب انتشار پذیری با نوع سیمان و درصد دوده سیلیس آن دو را نیز همانند عیارسیمان و نسبت آب به مواد سیمانی به دو قسمت تقسیم می کنیم. در این صورت داریم:

$$N_{\text{linear parameters}} = 32 \quad \text{و} \quad N_{\text{nonlinear parameters}} = 20 \quad (12)$$

$$N_{\text{parameters}} = 52 > \text{Data\_number} = 24 \quad (13)$$

همانطور که ملاحظه می شود به دلیل تعداد زیاد پارامترها این مدل نیز، غیر قابل قبول است.

### ج) تعلیم مدل سوگنو درجه یک با آموزش فقط پارامترهای خطی

روش سوم مانند روش اول است با این تفاوت که پارامترهای غیرخطی آموزش داده نمی شوند:

$$N_{\text{non-linear parameters}} = 0 \quad (14)$$

$$\text{Rules\_number} = \prod_i^{\text{dim}_{\text{input}}} N_{\text{number of gird input } i} = 4 \quad (15)$$

$$N_{\text{linear parameters}} = \text{Rules\_number} \times (1 + \text{dim}_{\text{input}}) = 24 \quad (16)$$

$$N_{\text{parameters}} = 24 = \text{Data\_number} = 24 \quad (17)$$

بنابر این در این حالت نتایج قابل اطمینان نیست برای کاهش تعداد پارامترها نسبت آب به مواد سیمانی و یا عیار سیمان را خطی در نظر میگیریم در این حالت داریم:

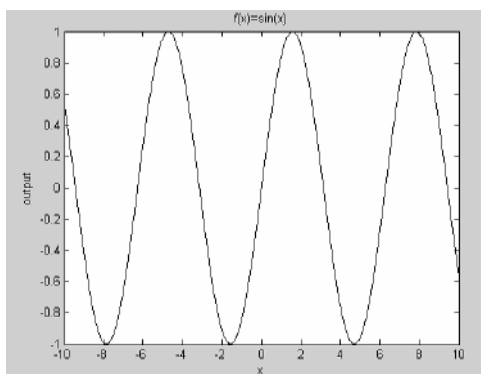
$$N_{\text{nonlinear parameters}} = 0 \quad \text{و} \quad N_{\text{linear parameters}} = 12 \quad (18)$$

$$N_{\text{parameters}} = 12 < \text{Data\_number} = 24 \quad (19)$$

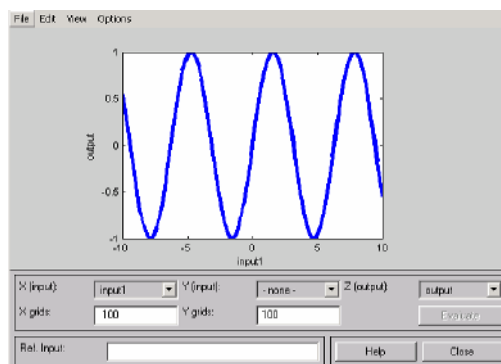
بنابر این در این حالت نتایج قابل اطمینان است. مزیت این روش علاوه بر قابل اطمینان بودن، این است که میتوان تغییرات داده‌هایی که فقط در دو یا سه نقطه تغییر میکنند را (با ثابت در نظر گرفتن تابع عضویت) خطی کرد و مشکل آن این است که فقط پارامترهای خطی یادگیری شده‌اند.

### ۳-۲- مقایسه

با توجه به آنچه در بخش انتخاب مدل آمد تعلیم مدل سوگنو درجه یک با آموزش فقط پارامترهای خطی بهترین گزینه است. از آنجا که برنامه‌های موجود تمام پارامترها را بهینه می‌کنند، برنامه‌ای به Matlab تهیه گردید که فقط پارامترهای خطی را با فرض سوگنو درجه صفر را به همان روش حداقل مربعات بهینه می‌کند. در این قسمت این روش با روش حداقل مربعات - که استفاده از همین روش با در نظر گرفتن تابع عضویت ثابت برای تمامی ابعاد می‌باشد - مقایسه شده است. برای بررسی صحت این روش در ابتدا تابع هموار  $\sin(x)$  بررسی شد و نتایج قابل قبولی بدست آمد (شکل ۵). آنگاه برای تابع  $\sin(x)/(x-0.5)$  که در نقطه 0.05 تکین می‌باشد برازش به عمل آمده ولی به دلیل اینکه توابع عضویت آموزش نمی‌دیدند در محدوده‌ای که به طور محلی دارای تغییرات زیادی این روش به خوبی عمل نمی‌کند (شکل ۶)، به هر حال با توجه به اینکه فیزیک مسئله دارای نقطه تکین نمی‌باشد، می‌توان از این روش استفاده کرد.

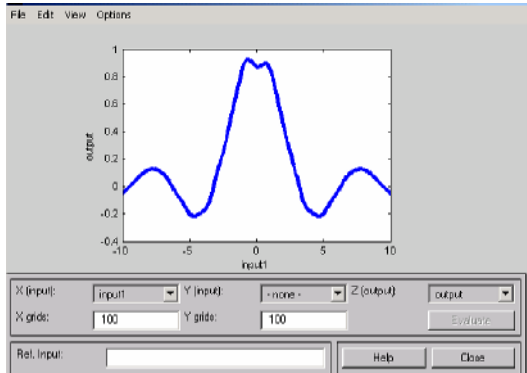


ب) تابع  $\sin(x)$

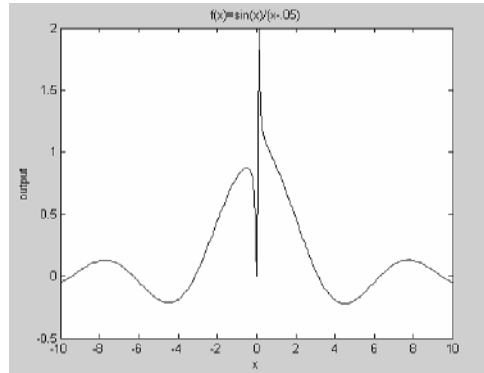


الف) روش شبکه عصبی فازی اصلاح شده

شکل ۵- بررسی صحت روش شبکه عصبی فازی اصلاح شده برای برازش تابع  $\sin(x)$



ب) تابع  $\sin(x)/(x-0.05)$



الف) روش شبکه عصبی فازی اصلاح شده

**شکل ۶- بررسی صحت روش شبکه عصبی فازی اصلاح شده برای برازش تابع  $\sin(x)/(x-0.05)$**

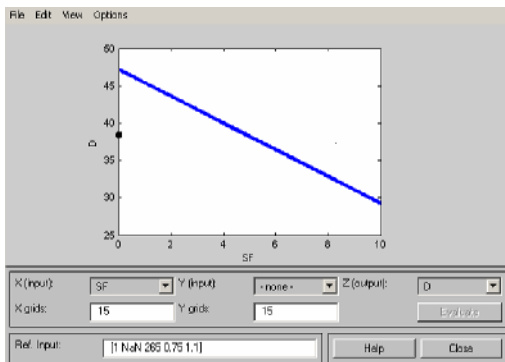
به عنوان نمونه نتایج روش شبکه عصبی فازی و حداقل مجموع مربعات به منظور بیان رابطه ضریب انتشار پذیری و درصد دوده سیلیس برای دو مقطع زیر (شکل ۷ و ۸) مقایسه گردیده است :

$CT = 2, C=470, W/C = 0.35, A=2.1\%$

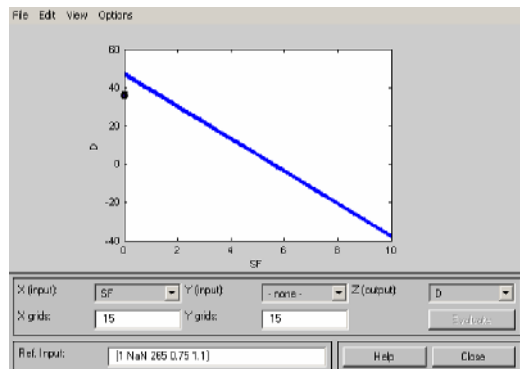
مقطع اول: (شکل ۷)

$CT = 1, C=265, W/C = 0.75, A=1.1\%$

مقطع دوم: (شکل ۸)

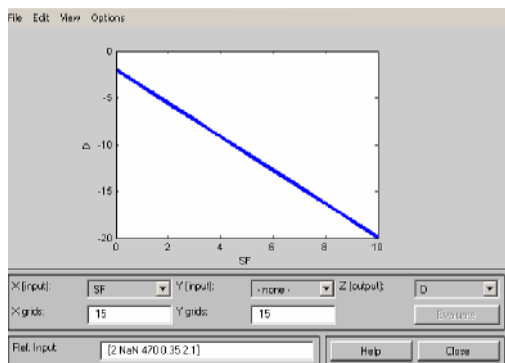


ب) روش حداقل مربعات

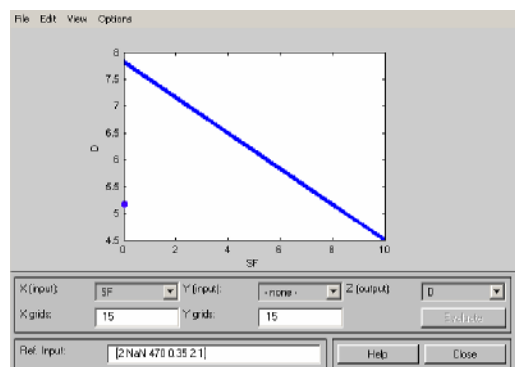


الف) روش شبکه عصبی فازی

**شکل ۷- رابطه برای دوده سیلیس و ضریب انتشار پذیری برای مقطع اول**



ب) روش حداقل مربعات



الف) روش شبکه عصبی فازی

**شکل ۸- رابطه برای دوده سیلیس و ضریب انتشار پذیری برای مقطع دوم**

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در محدوده  $SF=0\%$  که تعداد داده‌ها زیاد است، روش شبکه عصبی فازی با دقت بهتری نسبت به روش حداقل مجموع مربعات جواب داده است. در حالیکه در محدوده  $SF=10\%$  که تعداد داده‌ها ناکافی می‌باشد جواب روش شبکه عصبی فازی غیر قابل قبول (منفی) و جواب روش حداقل مجموع مربعات منطقی تر است. در شکل ۸ که مربوط به مقطع ۲ می‌باشد مشاهده می‌شود که در محدوده  $SF=0\%$  با وجود تعداد داده‌های نسبتاً زیاد، روش شبکه عصبی فازی با دقت نسبتاً خوبی جواب داده در حالیکه روش حداقل مجموع مربعات جواب غیر منطقی (منفی) داده است.

## نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به منظور بررسی تعیین ضریب انتشار پذیری بتن بر اساس تعداد محدود داده‌ها و با استفاده از شبکه عصبی فازی انجام پذیرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم شبکه عصبی فازی در هنگامی که تعداد داده‌ها کم می‌باشد، با آموزش پارامترهای خطی می‌تواند در حول و حوش داده‌ها جواب مناسبی ارائه دهد. برای کنترل نتایج در چند مقطع روند کلی تابع بررسی شد و مشاهده گردید که با افزایش درصد میکرو سیلیس و کاهش آب به مواد سیمانی و افزایش عیار سیمان ضریب انتشار پذیری کاهش می‌یابد که این نتایج با فیزیک مسئله تطابق دارد.

## مراجع

- [۱] یوسف شفاهی، محمد رضا فریانه، محمد تشنه لب، "مدلسازی تولید سفر با استفاده از روش شبکه‌های عصبی"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۶، شماره ۳، آذر ماه ۱۳۸۱، صفحات ۳۶۱ تا ۳۷۰
- [۲] شهرام وهدانی، کارولوکس، ایمان کریمی، "تحلیل اثر تشدید در دره‌های آبرفتی V شکل با استفاده از سیستم نرو فازی"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۷، شماره ۱، خرداد ماه ۱۳۸۲، صفحات ۶۳ تا ۷۴
- [3] J.-S. R. Jang and C.-T. Sun, " Neuro-Fuzzy Modeling and Control," The Proceedings of the IEEE, vol. 83, pp. 378-406, Mar. 1995
- [4] J.-S. R. Jang, " ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems," IEEE Transaction Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, pp. 665-685, May 1993
- [5] Tang Luping, "Chloride Penetration Profile and Diffusivity in Concrete under Different Exposure Conditions", Chamers University of Technology, Publication P-97:3, March 1997