

## استفاده از الگوریتم ژنتیکی و شبکه عصبی مصنوعی برای بهینه‌سازی مقاطع سدهای وزنی بتنی

امیراحمد دهقانی<sup>۱</sup>، غلامعلی منتظر<sup>۲\*</sup>، فرزین نصیری<sup>۳</sup>، مسعود قدسیان<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی هیدرولیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار مهندسی فناوری اطلاعات، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه توکیو

۴- استاد مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

\*تهران، صندوق پستی ۱۷۹-۱۴۱۱۵

montazer@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: تیر ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: بهمن ۱۳۸۴)

**چکیده** - مقطع سد، علاوه بر ارضای شرایط پایداری، باید مقرون به صرفه نیز باشد. در سدهای مخزنی و انحرافی، چنانچه طول قاعده مقطع سد حداقل شود، حجم بتن ریزی برای یک متر پهنا حداقل خواهد شد و این موضوع به اقتصادی بودن طرح کمک شایانی خواهد کرد. از این رو مسأله طراحی مقطع سد، یک مسأله بهینه‌سازی مفید است که قیود آن ارضای شرایط پایداری شامل: پایداری در برابر لغزش و واژگونی و همچنین تنش یا خستگی قائم در سطح بدنه سد خواهد بود. در این مقاله با ارائه روشی هوشمند مبتنی بر الگوریتم ژنتیکی و با در نظر گرفتن تمامی نیروهای وارد بر سد شامل: نیروی زلزله در بدنه و مخزن سد، نیروی بالابرنده و نیز نیروی ناشی از وزن و فشار آب سعی شده است با استفاده از مفاهیم رقابت و انتخاب اصلاح، الگوریتم مناسبی برای جستجو در فضای پاسخ ارائه شود که با استفاده از آن، شیبه‌های بالادست سد و همچنین طول قاعده آن به نحوی بهینه می‌شود که هم شرایط پایداری محقق شود و هم حجم بتن ریزی از نظر اقتصادی بهینه باشد. از آنجا که مقدار بهینه شیب و طول قاعده سد، تابعی غیرخطی از ضریب زمین لرزه و ارتفاع سد است، بنابراین لزوم استفاده از روشهایی که مستقل از مدل، به درون‌یابی روابط ذاتی میان داده‌ها بپردازد، احساس می‌شود. در این مقاله سعی شده است با استفاده از نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم ژنتیکی و تبیین ویژگیهای شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه‌ای از نوع تابع پایه شعاعی (RBF) همراه با قانون یادگیری انتشار خطای سریع (QP) برای بازیابی نگاشت غیرخطی میان الگوهای مستقل داده‌ها و متغیرهای وابسته طراحی شود تا به کمک آن، تخمین هوشمند مقطع بهینه سدهای بتنی وزنی میسر گردد. در این مقاله با مقایسه نتایج حاصل از این روش با روشهای مرسوم، مزایای روش جدید نیز مورد توجه قرار خواهد گرفت.

**کلید واژگان:** سدهای بتنی وزنی، مقطع بهینه، الگوریتم ژنتیکی، جهش، شبکه عصبی مصنوعی.

۱- مقدمه  
سدهای وزنی، پشت‌بنددار و قوسی تقسیم می‌شوند.

سدهای بتنی، از نظر شکل هندسی مقطع به سه دسته

سدهای وزنی سدهایی هستند که در آن تعادل سد به

مسأله را به رشته‌هایی کد شده (معمولاً دودویی) می‌نگارد. بدین ترتیب مسأله یافتن پاسخ مناسب معادل می‌شود با یافتن یک رشته خاص. بدین منظور با انتخاب مجموعه‌ای تصادفی از رشته‌ها، جمعیتی از پاسخهای بالقوه برای مسأله مورد نظر ایجاد می‌کند. آنگاه افراد این جمعیت براساس تابع هدف، که معیار سنجش کارایی آن رشته است، برای بقا و ایجاد پاسخهای جدید و بهتر با یکدیگر رقابت می‌کنند و به این ترتیب در نسلهای متوالی با استفاده از عملگرهای سه‌گانه انتخاب، ترکیب و جهش، کمیت و کیفیت پاسخهای مناسب افزایش می‌یابد و این روند تا همگرایی الگوریتم و یافتن پاسخ نهایی ادامه می‌یابد.

در این تحقیق با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر سد (نیروی زلزله در بدنه و مخزن سد، نیروی بالابرنده و نیروی ناشی از وزن و فشار آب)، سعی شده است که شیب بالادست و همچنین طول قاعده با استفاده از روش جستجوی ژنتیکی به نحوی بهینه شود که هم‌زمان هم شرایط پایداری محقق شود و هم مقطع سد از نظر اقتصادی بهینه باشد.

همچنین با توجه به اینکه مقطع بهینه سد بتنی وزنی، تابعی غیرخطی از دو پارامتر ضریب زلزله خیزی منطقه و ارتفاع سد است، بنابراین لزوم استفاده از روشهایی که در آنها بر اساس روابط ذاتی میان داده‌ها، نگاشتی غیرخطی بین متغیرهای مستقل و وابسته برقرار گردد، احساس می‌شود. یکی از روشهای جدید در حل مسائل مهندسی، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی است. در این روش بر اساس آموزش شبکه، خصلتهای نهانی الگوها بازیابی می‌شود به طوری که پس از یادگیری، شبکه می‌تواند آموخته‌های خود را به حالت‌های مشابه تعمیم دهد [۱۲].

## ۲- الگوریتم جستجوی ژنتیکی

الگوریتم جستجوی ژنتیکی روشی است که به صورت موازی و چندجانبه از نقاط مختلفی از فضای حل

کمک نیروهای خارجی، مانند نیروهای فشار آب، فشار موج، فشار رسوب، فشار بالابرنده و نیز به وسیله وزن خود سد برقرار می‌شود؛ در حالی که سدهای قوسی سدهایی هستند که بیشتر بار افقی آب را به وسیله قوس خود به پایه‌ها منتقل می‌کنند و بنابراین باید تکیه‌گاههای جانبی ساختگاه، استحکام و مقاومت کافی را در برابر نیروهای وارد شده داشته باشند [۱]. با توجه به اینکه در سدهای وزنی، اولاً وزن سد در ایجاد پایداری سازه و ایجاد تعادل در برابر نیروهای محرک مانند زلزله و نیروهای بالابرنده نقش مهمی را ایفا می‌کند و ثانیاً در ساخت سد از بتن استفاده می‌شود، هزینه ساخت این سدها معمولاً بیش از سدهای دیگر است. بنابراین اگر بتوان به نحوی مقطع سد را بهینه کرد تا حجم بتن مصرفی در ساخت سد کاهش یابد به اقتصادی بودن طرح کمک فراوانی خواهد شد. این موضوع به‌ویژه در کشورهایی مانند چین و ژاپن، با توجه به تعداد زیاد سدهایی که در آنجا در حال ساخت است، بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است [۲-۶]. مطالعات این پژوهشگران بیشتر بر روی سدهای قوسی و بر اساس یافتن مقاطع بهینه سدها با استفاده از الگوریتمهای مرسوم ریاضی استوار بوده است؛ لیکن از آنجا که اولاً با پیچیده‌تر شدن مسأله، استفاده از الگوریتمهای ریاضی بهینه‌سازی بسیار مشکل می‌شود و ثانیاً با توجه به اینکه در این الگوریتمها براساس منطقه شروع در میدان حل ممکن است جوابهای مختلفی به دست آید (به عبارت دیگر در نقاط بهینه محلی گرفتار شود)، بنابراین لزوم استفاده از یک روش هوشمند بهینه‌سازی که بتواند در قسمتهای مختلف فضای حل جستجو کند و به راحتی از نقاط بهینه محلی رها شود، احساس می‌شود.

روش جستجوی ژنتیکی تلاشی است برای شبیه‌سازی و به‌کارگیری برخی خصوصیات و تواناییهای تکامل در بهینه‌سازی این روش، ابتدا با یک نگاشت مناسب و معکوس‌پذیر، استراتژیهای ممکن برای حل

ز- نیروی ناشی از یخبندان دریاچه؛

ح- نیروی حرکت امواجی بر روی دریاچه؛

ط- نیروی باد؛

ی- زمین لرزه ( $Fe, Fe_1, Fe_2, Fe_3$ ).

از آنجا که تمامی نیروهای پیش گفته به طور همزمان بر بدنه سد اعمال نمی‌شوند، لذا ترکیب بحرانی زیر در این تحقیق برای تحلیل پایداری سد در نظر گرفته شده است. برای حالتی که مخزن در حالت پر قرار دارد نیروی رانش آب در تراز نرمال - که سطح آب در حالت غیر سیلابی نباید بالاتر از آن قرارگیرد- برابر با حداکثر زیر فشار (بدون زهکشی زیر سد) و برای حالتی که مخزن خالی است نیروی وزن سد برای کنترل خستگیهای حداکثر در نقاط پاشنه سد در نظر گرفته شده است [۱۰].

### ۳-۱- نیروهای وارد بر سد

در شکل ۱ نیروهای وارد بر سد وزنی بتنی نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان نیروهای وارد بر سد را به دو دسته: نیروهای در جهت پایداری و نیروهای در خلاف جهت پایداری تقسیم کرد. نیروهایی که در جهت پایداری سد عمل می‌کنند عبارتند از:

نیروی ناشی از وزن سد ( $W$ ): برای محاسبه این نیرو، مقطع طولی سد را به یک سری مثلث و مستطیل تقسیم‌بندی کرده و سطح آن را به دست می‌آورند. محاسبات برای یک متر پهنا انجام می‌شود لذا لازم است سطح به دست آمده در وزن مخصوص بتن  $\gamma_c$  ضرب شود. در رابطه‌های زیر نیروهای وزن  $W_1, W_2, W_3$  بر حسب متغیرهای  $F_b, T, h, b, m$  بیان شده‌اند:

$$W_1 = \frac{1}{2} \gamma_c \cdot m \cdot b \cdot h \quad (1)$$

$$W_2 = \gamma_c \cdot T \cdot (F_b + h) \quad (2)$$

$$W_3 = \gamma_c \cdot \frac{h(b - mb - T)^2}{2(b - mb)} \quad (3)$$

جستجو را آغاز می‌کند. این روش در سال ۱۹۷۳ میلادی توسط هلند معرفی شد [۷] و پس از آن به طور وسیعی در مسائل مهندسی، به ویژه در مسائل بهینه‌سازی شبکه‌های لوله، سازه‌های ساختمانی، کالیبراسیون، مدل‌های بارش روناب و پمپاژ آبهای زیرزمینی استفاده شد [۸]. اساس روشهای جستجوی ژنتیکی بر فرایند انتخاب اصلح در نظام طبیعی استوار است؛ انتخاب اصلح یعنی اینکه موجوداتی که شایستگی بالاتر و سازگاری بیشتری با طبیعت دارند امکان بقا و تولید مثل افزونتری می‌یابند و پس از چند نسل به درجه شایستگی بالاتری می‌رسند. فرایند انتخاب اصلح با ترکیب عملگرهای ژنی شامل: به‌گزینی، تولید مثل، تلاقی و جهش انجام می‌شود. در مدلسازی ریاضی جستجوی ژنتیکی، اجزای مدل به نحوی تعبیه می‌شوند تا هر یک از عملگرهای ژنتیکی را مشابه‌سازی کرده و فرایند طبیعی انتخاب اصلح را شبیه‌سازی نمایند. در این روش ابتدا جمعیت اولیه متغیرها به صورت تصادفی تولید می‌شود و سپس با اعمال عملگرهای ژنتیکی، نسل جدیدی تولید می‌شود که شایستگی بالاتری دارند. بدین ترتیب پس از تکرار چندین نسل، شایسته‌ترین نسل که همان پاسخ مسأله است تولید می‌شود [۹].

### ۳- تبیین مسأله

شکل ۱ مقطع معمول سدهای بتنی وزنی را نشان می‌دهد. در حالت کلی نیروهای وارد بر سد وزنی به شرح ذیل است:

الف- نیروی هیدروستاتیک فشار آب در بالادست ( $F_1$ )؛

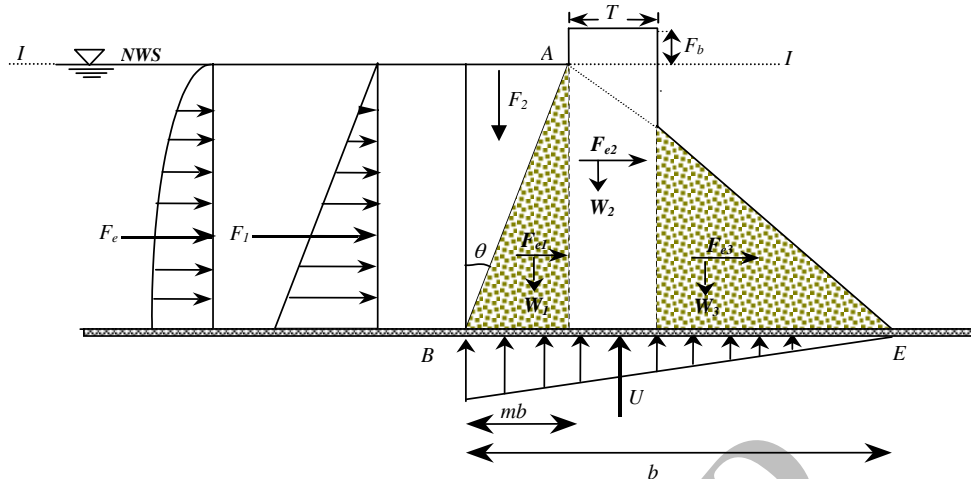
ب- نیروی هیدروستاتیک فشار آب در پایین دست؛

ج- وزن آب موجود در بالادست سد (روی ضلع شیبدار بالادست) ( $F_2$ )؛

د- وزن سد (مهمترین نیروی مقاوم) ( $W_1, W_2, W_3$ )؛

ه- نیروی زیرفشار ( $U$ )؛

و- نیروی رانش ناشی از تجمعات رسوبات سیلتی در پشت سد؛



شکل ۱ مقطع معمول سدهای بتنی وزنی و نیروهای اعمال شده برای طراحی

براساس وزن سد و ضریب زمین‌لرزه، که به صورت نسبت شتاب زمین‌لرزه به شتاب ثقل تعریف می‌شود، محاسبه خواهد شد. شایان ذکر اینکه در اکثر سدهای ایران این ضریب حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

$$F'_{ei} = \alpha \cdot W_i \quad (7)$$

نیروی ناشی از زمین‌لرزه در مخزن سد: نیروی زمین‌لرزه در مخزن سد تا عمق \$y\$ از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$F_e = 0.1726 \cdot p_e \cdot y \quad (8)$$

که در آن فشار هیدرودینامیکی ناشی از زمین‌لرزه در ارتفاع \$y\$ از سطح آب است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_e = c \cdot \alpha \cdot \gamma_w \cdot y \quad (9)$$

در رابطه فوق ضریب \$c\$ را می‌توان بر حسب \$\theta\$ (زاویه وجه بالادست با خط قائم) و نسبت \$\left(\frac{y}{h}\right)\$ محاسبه کرد:

$$c = \frac{0.173}{2} \left( \frac{90 - \theta}{\theta} \right) \left[ \frac{y}{h} \left( 2 - \frac{y}{h} \right) + \sqrt{\frac{y}{h} \left( 2 - \frac{y}{h} \right)} \right] \quad (10)$$

همچنین گشتاور ناشی از نیروی هیدرودینامیکی زمین‌لرزه در مخزن سد در ارتفاع \$y\$ از سطح آب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$M_e = 0.1229 p_e \cdot y^2 \quad (11)$$

چنانچه در رابطه‌های فوق به جای ارتفاع \$y\$ از کل ارتفاع

در رابطه‌های فوق \$\gamma\_c\$ وزن مخصوص بتن، \$T\$ عرض تاج و \$F\_b\$ ارتفاع آزاد سد است.

نیروی ناشی از فشار قائم آب (\$F\_2\$): مقدار این نیرو برابر با وزن آب قرار گرفته روی بدنه بالادست سد است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot m \cdot b \cdot h \quad (4)$$

نیروهایی که در برخلاف پایداری سد عمل می‌کنند عبارتند از:

نیروی فشار افقی آب در جهت حرکت آب (\$F\_1\$): برای محاسبه این نیرو از توزیع فشار مثالی که در شکل ۱ نشان داده شده، استفاده می‌شود:

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot h^2 \quad (5)$$

نیروی زیرفشار (\$U\$): با توجه به نفوذپذیری پی و تراوش آب از زیر سد و وجود اختلاف فشار بین بالادست و پایین‌دست سد، نیرویی در جهت بالا بر وجه تحتانی سد وارد می‌شود که به نام نیروی بالابرنده معروف است. برای محاسبه این نیرو می‌توان از توزیع خطی فشار در این قسمت استفاده کرد [۱۱]:

$$U = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot b \cdot h \quad (6)$$

نیروی ناشی از زمین‌لرزه در بدنه سد (\$F'\_e\$): این نیرو

۱/۵ است. با توجه به نیروهای زمین‌لرزه و زیر فشار، این ضریب تا حدود ۱ کاهش می‌یابد.

$$S_F = \frac{f' \cdot \Sigma F_V}{\Sigma F_H} \quad (16)$$

### ج- ضریب اطمینان در برابر برش - اصطکاک:

اینجا نیروهای برشی در محاسبات وارد می‌شود:

$$SFF = \frac{f' \cdot \Sigma F_V + b \cdot \sigma}{\Sigma F_H} \quad (17)$$

در رابطه فوق  $b$  طول قاعده در سطح مورد مطالعه و  $\sigma$  تنش برشی مجاز مواد در سطح برش است. تنش برشی مجاز بتن حدود  $\frac{1}{4}$  مقاومت برشی یا  $\frac{1}{20}$  مقاومت فشاری آن است. تنش برشی مجاز بتن بین ۷ تا ۱۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در نظر گرفته می‌شود. ضریب اصطکاک استاتیک  $f'$  برای حرکت بتن بر روی سنگ یا بتن در سطح بتنی اغلب بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ تغییر می‌یابد که به‌طور متوسط برابر ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود. مطابق استاندارد USBR برای سدهای کوتاه، در صورتی که این احتمال وجود داشته باشد که در اثر شکسته شدن سد خسارت جانی و مالی به بار آید  $SFF \geq 4$  در نظر گرفته می‌شود [۱۵].

د- تنش یا خستگی قائم در سطح بدنه سد: برای مطالعه خستگی قائم در سطح بدنه سد در سراب و پایاب از رابطه‌های زیر استفاده می‌شود:

$$\sigma_u = \frac{\Sigma F_V}{b} - \frac{6 \Sigma M_o}{b^2} \quad (18)$$

$$\sigma_d = \frac{\Sigma F_V}{b} + \frac{6 \Sigma M_o}{b^2} \quad (19)$$

در این رابطه‌ها  $\sigma_u$  و  $\sigma_d$  به ترتیب خستگی قائم در سطح بدنه سد در سراب و پایاب، در مقطع مورد بررسی،  $b$  عرض در مقطع مورد بررسی،  $\Sigma M_o$  مجموع ممانهای نیروهای وارد بر سد تا سطح مورد بررسی و نسبت به مرکز سطح و  $\Sigma F_V$  مجموع نیروهای قائم است.

آب مخزن (یعنی  $h$ ) استفاده شود، داریم:

$$P_e = 0.73 \left( \frac{90 - \theta^\circ}{90^\circ} \right) \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot h \quad (12)$$

$$F_e = 0.726 \cdot p_e \cdot h \quad (13)$$

$$M_e = 0.229 \cdot p_e \cdot h^2 \quad (14)$$

### ۳-۲- معیارهای پایداری

با توجه به وضعیت سد از نظر مکانی و درجه بندی و تأثیر خرابی سد معمولاً سعی می‌شود پایداری سد به‌ویژه پایداری پی آن، بالا باشد. ضرایب اطمینان داده شده معمولاً مقادیر حداقلی هستند که با تجربه به دست آمده و واضح است که انتخاب ضرایب اطمینان بالا نیز، اقتصادی بودن طرح را زیر سؤال خواهد برد.

برای ارزیابی پایداری سدها معمولاً باید سه نوع پایداری در مقابل لغزش، تنش یا خستگی قائم در سطح بدنه سد و پایداری در برابر واژگونی بررسی شود:

پایداری در برابر لغزش: برای ارزیابی پایداری سدهای کوتاه در مقابل لغزش سه روش وجود دارد:

#### الف- ضریب لغزش مطمئن: نسبت مجموع نیروهای

افقی ( $\Sigma F_H$ ) به مجموع نیروهای قائم ( $\Sigma F_V$ )، با در نظر گرفتن نیروی زیر فشار، ضریب لغزش  $f$  را به دست می‌دهد:

$$f = \frac{\Sigma F_H}{\Sigma F_V} \leq f' \quad (15)$$

چنانچه  $f$  محاسبه شده، کوچکتر از ضریب اصطکاک استاتیکی ( $f'$ ) باشد، سد پایدار تلقی می‌شود. بدون در نظر گرفتن نیروی زمین‌لرزه چنانچه  $f \leq 0.65$  باشد و با در نظر گرفتن نیروی زمین‌لرزه در صورتی که  $f \leq 0.85$  باشد، سد پایدار است [۱۴].

#### ب- ضریب اطمینان در برابر لغزش: در این روش

نیروهای برشی در جهت افزایش پایداری تلقی می‌شوند. برای سدهای کوتاه روی پی‌های سنگی این ضریب ۱ تا

لغزش، واژگونی و خستگیهای قائم در بدنه سد محاسبه می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار Mathematica، ضرایب فوق برای سه حالت (که در آنها عمق آب در بالادست سد برابر ۱۶، ۲۰ و ۳۰ متر و ضریب زمین‌لرزه معادل ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ است)، محاسبه می‌شود؛ بنابراین برای ۹ حالت مختلف از ترکیبات فوق کلیه ضرایب اطمینان در برابر لغزش و واژگونی و مقادیر خستگی قائم در بدنه برحسب  $m$  و  $b$  به دست می‌آید.

باتوجه به اینکه در سدهای مخزنی و انحرافی رقوم نرمال سطح آب براساس ضوابطی خاص تعیین می‌شود (و در نتیجه عمق در مخزن مشخص است)، چنانچه طول قاعده سد ( $b$ ) در مثلث  $ABE$  در شکل ۱ حداقل شود، مساحت مثلث و در نتیجه حجم بتن‌ریزی برای یک متر پهنا کمینه خواهد شد. شایان ذکر اینکه چنانچه رأس  $A$  در مثلث  $ABE$  در راستای  $AI$  در هر نقطه دلخواه قرار گیرد، مساحت مثلث  $ABE$  ثابت می‌ماند اما با تغییر مکان نقطه  $A$ ، نیروی  $F_2$  و همچنین تنشهای ایجاد شده در بدنه سد در سراب تغییر خواهد کرد. بنابراین می‌توان مسأله را به شکل یک مسأله بهینه‌سازی مقید مطرح کرد و لازم است تابع هدف و توابع قید معرفی شوند.

در این تحقیق، تابع هدف به صورت مجموع وزنهای  $W_1$ ،  $W_2$  و  $W_3$ ، که معرف کل وزن سد در واحد پهناست و میزان بتن مصرفی را نشان می‌دهد، تعریف شده است. به‌عنوان مثال تابع هدف برای حالتی که  $\alpha = 0/1$  و  $h = 16m$  باشد، با رابطه ۲۱ بیان می‌شود.

علاوه بر این مهمترین قید مسأله، ارضای شرایط پایداری شامل: پایداری در برابر لغزش - واژگونی و کنترل تنش قائم در سطح بدنه سد است، این قید برای حالتی که  $\alpha = 0/1$  و  $h = 16m$  است به شکل رابطه‌های ۲۲-۲۵ بیان می‌شود:

شایان ذکر اینکه در اینجا نیروها در جهت نیروی ثقل، مثبت و در جهت خلاف آن منفی و همچنین ممانها در جهت عقربه ساعت مثبت و در جهت خلاف آن منفی در نظر گرفته می‌شود.

برای اینکه سد در برابر خستگی قائم ایجاد شده پایدار باشد، باید  $\sigma_{II}$  و  $\sigma_{III}$  در شرایط پر یا خالی بودن مخزن مثبت باشند و نباید این مقدار از مقاومت فشاری مجاز تجاوز کند. معمولاً مقاومت فشاری آزموده بتن برای سدها را در محدوده ۱۴۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم برسانتیمتر مربع در نظر می‌گیرند.

#### ۵- پایداری در برابر واژگونی: چنانچه مجموع

لنگرهای مقاوم نسبت به پنجه سد (نقطه  $E$  در شکل ۱) حدود ۱/۵ تا ۱/۷ برابر مجموع لنگرهای واژگون‌کننده نسبت به همان نقطه باشد، بر طبق آنچه متعارف است، سد در برابر واژگونی پایدار می‌ماند به عبارت دیگر داریم [۱۵]:

$$\sum F_{(over)} = \frac{\sum M_E}{\sum M_E} = 1/5 - 1/7 \quad (20)$$

#### ۴- راهکار حل مسأله

در این تحقیق ابتدا کلیه نیروها و گشتاورهای لازم برای کنترل انواع پایداری سد که در قسمت قبل به آنها اشاره شد، محاسبه می‌شود؛ در تمامی نیروها و گشتاورهای محاسبه شده، متغیرهای  $h$  (عمق آب در مخزن سد)،  $m$  (ضریبی که به‌نحوی به شیب بالادست مربوط است) و  $b$  (عرض سد در قسمت تحتانی سد)،  $F_b$  (ارتفاع آزاد آب)،  $T$  (عرض تاج سد و  $\alpha$  ضریب زمین‌لرزه وجود دارد. برای آنکه بتوان نتایج حاصل از این تحقیق را با نتایج موجود مقایسه کرد، عرض تاج سد را برابر ۱/۵ متر و ارتفاع آزاد سد را، مطابق آیین‌نامه، برابر ۴ درصد عمق آب در مخزن در نظر گرفته‌ایم [۱۵]. با توجه به نیروها و گشتاورهای محاسبه شده، ضرایب اطمینان در برابر

$$\sum F_v = W_1 + W_v + W_r = 59/9.04 + 19/2bm + \frac{19/2(b-b.m-1/5)^2}{(b-b.m)} \quad (21)$$

$$F = -6/0.32(0.30+b)(73/82+b) + 6/0.32b(73/85+b)m + b(27/135-27/135m) \times$$

$$\text{Arctg}\left(\frac{bm}{16}\right) \frac{1}{-135/2 + b(-7/238 + 7/238m + 25/133b(m-1)(1/4+m))} < 0.85 \quad (22)$$

$$F' = \frac{128b(m-1)}{-43/2 + b(-2.304m + 8b(m-1)(1.4+m))} < 0.65 \quad (23)$$

$$SFF = \frac{-95/0.02 + b(-5/0.67 + 5/0.67m + 17/593b(m-1)(13/9+m))}{(-6/0.32(0.305+b)(73/832+b) + 6/0.32b(73/85+b)m + b(27/14-27/14m)\text{Arctg}\left(\frac{bm}{16}\right))} \geq 4 \quad (24)$$

$$\text{Sigmauf} = \frac{1}{b^4 + (m-1)^2 \pi} [(651/4 + b(-2117/18 - 13842/3b(-1/0.2+m)(m-1) + 2117/2m - 43/43b^2(m-1)^2(3/78+m) - 50/27b^2(m-0/999)(1/4+m) + (-2/0.00+m)m) + 1072/84b^2(m-1)^2 \text{Arctg}\left(\frac{bm}{16}\right)] > 0 \quad (25)$$

زنجیر اطلاعات انتخاب شده و کلیه صفر و یک‌های بین این دو نقطه در دو زنجیر در زمان ترکیب، با یکدیگر تعویض می‌شوند؛ همچنین با انتخاب درصد مناسب برای احتمال جهش، مکان یا مکانهایی از زنجیر جواب انتخاب شده و اعداد این مکانها، از صفر به یک و بعکس تبدیل می‌شود سپس تابع هدف به ازای جمعیت جدید محاسبه شده و این روال آنقدر تکرار می‌شود تا یا تمامی جوابها به سمت نقطه بهینه هدایت شوند یا تعداد تکرارها به حد تعیین شده برسد. مقادیر اولیه الگوریتم ژنتیکی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیکی

درصد احتمال جهش: ۰/۰۰۵	جمعیت: ۲۰۰ نمونه
درصد احتمال ترکیب: ۰/۸۵	تولید: ۴۰۰ نمونه
درصد احتمال انتخاب: ۰/۸۵	نوع ترکیب: ترکیب دونقطه‌ای

شایان ذکر اینکه انتخاب مناسب این مقادیر در زمان اجرای الگوریتم و نیفتادن در نقاط بهینه محلی بسیار تأثیرگذار است.

در این تحقیق به منظور یافتن  $m$  و  $b$ ، به نحوی که وزن بتن مصرفی در ساخت سد کمینه و همه شرایط پایداری ارضا شود، از الگوریتم جستجوی ژنتیکی استفاده شده است. بدین منظور از نرم‌افزار Goal، که مسائل بهینه‌سازی را براساس الگوریتم جستجوی ژنتیکی در محیط ویندوز انجام می‌دهد، بهره گرفته شده است. به منظور استفاده از این نرم‌افزار ابتدا باید محدوده تغییرات و نوع متغیرها و سپس توابع هدف و قیود معرفی گردند. ابتدا تعدادی پاسخ در محدوده مجاز تغییر پارامترها حدس زده می‌شود و با تبدیل این اعداد به رشته صفر و یک، مقادیر تابع هدف به ازای این پاسخها به دست می‌آید. آنگاه به روش دیسک‌گردان، زنجیرهایی که تابع هدف به ازای آنها کمینه می‌شود، باقی مانده و بقیه حذف می‌شوند. پس از انتخاب زنجیرها و با برگزیدن درصد مناسب احتمال ترکیب مکانهایی از تابع زنجیرها برای رد و بدل کردن اطلاعات انتخاب می‌شود.

در این تحقیق از ترکیب دونقطه‌ای برای ترکیب زنجیره‌های صفر و یک استفاده شده است. دو نقطه از

### ۵- بهینه‌سازی مقطع سدهای وزنی

نمونه‌ای از نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم ژنتیکی برای یافتن نقطه بهینه مقطع سدهای وزنی با داده‌های مختلف، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ نتایج حاصل از به‌کارگیری روش جستجوی ژنتیکی برای یافتن پارامترهای بهینه  $(b, m)$

شرایط نتایج جستجو	m	b(m)	تابع هدف T ( $t/m$ )
$h = 16m$ $\alpha = 0.1$	0.140	15/93	311/312
$h = 16m$ $\alpha = 0.15$	0.207	17/60	343/320
$h = 16m$ $\alpha = 0.2$	0.278	19/28	375/648
$h = 20m$ $\alpha = 0.1$	0.145	20/05	486/774
$h = 20m$ $\alpha = 0.1$	0.215	22/04	534/444
$h = 20m$ $\alpha = 0.2$	0.277	24/16	585/318
$h = 30m$ $\alpha = 0.1$	0.146	30/36	1098/410
$h = 30m$ $\alpha = 0.15$	0.159	35/20	1272/240
$h = 30m$ $\alpha = 0.2$	0.285	36/49	1319/116

به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم ژنتیکی با روشهای مرسوم، در جدول ۳ مقادیر  $m$  و  $b/h$  به ازای دو مقدار مختلف ضریب زلزله بر اساس توصیه‌های موجود برای پارامترهای بهینه مقطع سد بتنی وزنی، ارائه شده است [۱۵]؛ همچنین به‌طور متوسط از نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم ژنتیکی به نتایج جدول ۴ دست می‌یابیم [۱۶].

جدول ۳ مقادیر پارامترهای بهینه مقطع سدهای بتنی وزنی بر حسب استانداردهای موجود [۱۵]

شرایط نتایج	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.2$
m	0.15	0.3
$\frac{b}{h}$	1/0.4	1/2.7

جدول ۴ مقادیر  $m$  و  $\frac{b}{h}$  بهینه برای ضرایب مختلف شتاب زلزله با استفاده از الگوریتم ژنتیکی

شرایط نتایج	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.2$
m	0.144	0.280
$\frac{b}{h}$	1/0.04	1/3.10

همچنین چنانچه مقادیر تابع هدف، مطابق مقادیر توصیه شده در جدول ۳ برای  $\alpha = 0.1$  و  $h = 16m$  در نظر گرفته شود، وزن بتن مصرفی برابر  $326/2$  تن در هر متر پهنای سد خواهد شد؛ در صورتی که از مقادیر به‌دست آمده از روش جستجوی ژنتیکی استفاده شود، مقدار وزن نشان‌دهنده آن است که در هر متر پهنای سد به‌دست خواهد آمد که ۹ تن صرفه‌جویی کنیم.

با توجه به نتایج جدول ۲ ملاحظه می‌شود که به ازای مقادیر مختلف ارتفاع آب داخل مخزن ( $h$ ) و ضریب زلزله خیزی منطقه ( $\alpha$ )، مقادیر  $m$  و  $b$  بهینه، با مقادیر متوسط آنها که در جدول ۴ قید شده، متفاوت است. بنابراین اگر به‌نحوی بتوان در هر مورد بر اساس ارتفاع آب و ضریب زلزله خیزی منطقه از مقادیر مندرج در جدول ۲ استفاده کرد، می‌توان به اقتصادی‌تر شدن طرح کمک فراوانی کرد. به‌طور مثال به ازای  $\alpha = 0.1$  و



سیستمهای زیستی هستند. عملکرد هر نرون چنین است که هر سلول، مجموع وزندار سیگنالهای ورودی را یافته و سپس آن را با حد آستانه تابع تحریک مقایسه می‌کند و بدین ترتیب خروجی هر نرون محاسبه می‌شود. بر اساس ترکیبهای مختلف نرونها و قوانین مختلف یادگیری، شبکه‌های مختلفی تشکیل می‌شود که یکی از کاربردی‌ترین آنها در علوم مهندسی برای نگاشت غیرخطی، شبکه‌های پسانتشار خطا (MLP)<sup>۱</sup> و شبکه‌های تابع پایه شعاعی (RBF)<sup>۲</sup> هستند [۱۷].

شبکه‌های تابع پایه شعاعی از خانواده شبکه‌های رو به جلو همراه با سه لایه هستند که برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ میلادی توسط برومهود و لاو معرفی شدند [۱۸]. تفاوت عمده این شبکه با شبکه‌های پسانتشار خطا در این است که دارای یک لایه میانی بوده و توابع تحریک نرونها، توابع شعاعی (مثلاً توابع گوسی) همراه با مرکز و عرض خاصی است. علاوه بر این به خلاف شبکه پسانتشار خطا که مجموع وزندار نرونهای رسیده به نرون لایه میانی به عنوان ورودی توابع تحریک محاسبه می‌شوند، در اینجا فاصله بین هر الگو با بردار مرکز هر نرون در لایه میانی، به عنوان ورودی تابع تحریک شعاعی محاسبه می‌شود. در فضای چندبعدی سطح آستانه نرونهای لایه میانی به صورت توابعی گوسی است که بیشترین مقدار را در مرکز دارد و با افزایش فاصله از مرکز، پاسخ به سمت صفر میل می‌کند. به علت انتخاب تابع گوسی در نرونهای لایه میانی، این شبکه مسائل دسته‌بندی را به خوبی حل می‌کند زیرا به صورت شعاعی می‌تواند الگوها را بر روی دواير متحدالمرکزی تقسیم نماید و بردارهای مختلف با فواصل یکسان از مرکز را در یک دسته قرار دهد. از تفاوت‌های دیگر این شبکه با شبکه پسانتشار خطا این است که توابع تحریک نرونهای خروجی این شبکه توابع خطی ساده هستند و به همین

$h = 16m$  چنانچه از نتایج جدول ۲ استفاده شود، وزن بتن مصرفی برابر ۳۱۱،۳۱۲ تن در هر متر پهنای سد خواهد شد که نسبت به مقادیر متوسط قید شده در جدول ۴، حدود ۶ تن بتن در هر متر پهنای سد صرفه‌جویی می‌شود. از آنجا که رابطه متغیرها به صورت غیرخطی است، بنابراین در این مقاله از روش هوشمند شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین مقطع بهینه سد استفاده می‌شود.

## ۶- شبکه عصبی مصنوعی

هرچند زمان زیادی از ابداع شبکه‌های عصبی مصنوعی سپری نشده، لیکن به دلیل آنکه شیوه پردازشی آن به عملکرد مغز انسان شبیه بوده و می‌تواند تا اندازه‌ای عملکردی مشابه با شبکه‌های زیستی در یادگیری داشته باشد و این یادگیری را تعمیم دهد، دامنه تحقیقات در این زمینه روز به روز گسترده‌تر می‌شود. ایده اصلی شبکه‌های عصبی مصنوعی بر مبنای شبیه‌سازی شبکه عصبی انسان است؛ مهمترین عنصر پردازش در سیستمهای زیستی نرون است. در مغز انسان بیش از ۱۰۰ میلیارد نرون وجود دارد که هر یک با حدود ده هزار نرون دیگر مرتبط بوده و یک ساختار متراکم را ایجاد کرده است [۱۷]. هر نرون شامل شاخه‌هایی ورودی به نام دندریت، هسته اصلی (بدنه) و یک شاخه‌های خروجی به نام اکسون است. اکسون نرون در محل سیناپس به دندریت‌های نرونهای دیگر متصل می‌شود. هنگامی که نرون فعال شود سیگنالی الکتروشیمیایی درون اکسونهایش ایجاد کرده، این سیگنال از طریق سیناپسها به نرونهای دیگر رسیده و آنها را تحریک می‌کند. هر نرون زمانی فعال می‌شود که مجموع سیگنالهای رسیده به بدنه آن از حد آستانه مشخصی بیشتر شود. قدرت سیگنال رسیده به هر نرون به اثر سیناپسها بستگی دارد. هر نرون تعدادی ورودی را از داده‌های اصلی (سیگنالهای حسی) یا از خروجی نرونهای دیگر دریافت می‌کند. هر اتصال دارای قدرت (وزن) خاصی میان دو نرون است؛ این وزنها شبیه اثر سیناپسها در

1. Multi Layer Perseptron  
2. Radial Basis Function

## ۸- الگوریتم آموزش شبکه عصبی

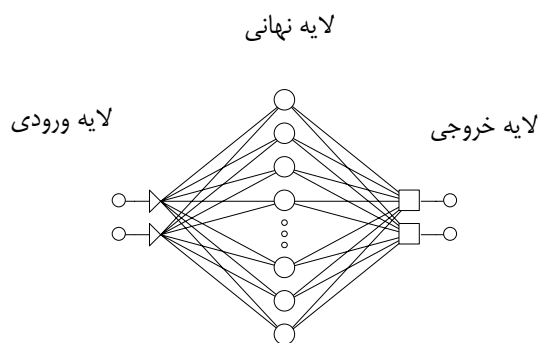
در ساخت مدل بر مبنای شبکه عصبی، اولین مرحله انتخاب نوع شبکه است. در این تحقیق از شبکه عصبی تابع پایه شعاعی استفاده شد. برای طراحی شبکه عصبی با تابع پایه شعاعی، تعیین تعداد نرونهای لایه میانی و عرض و مراکز این نرونها و تعیین وزنها و اتصالاتی بین نرون لایه میانی و خروجی باید انجام شود. اگر فرض شود که تعداد نرون لایه میانی، به دست آمده است، لازم است در مرحله اول مراکز و عرض نرونها تعیین شود. این اولین مرحله یادگیری شبکه است که بدون راهنما انجام می شود. روشهای مختلفی برای این منظور استفاده می شود که از معروفترین آنها روش میانگین  $K$  است. در این روش ابتدا مراکز فرضی برای نرونها انتخاب شده و سپس با توجه به معیار فاصله اقلیدسی هر الگو تا مراکز نرونها، تعلق هر الگو به یکی از نرونهای لایه میانی مشخص می شود. اگر میانگین مؤلفه های بردارهای متعلق به هر نرون را محاسبه کنیم، بردار مرکز جدید هر نرون مشخص خواهد شد. اگر این بردار مرکز نسبت به بردار مرکز فرض شده قبلی جابه جایی نداشته باشد، بردار جدید به عنوان بردار مرکز نرونها محسوب خواهد شد [۲۲].

برای تعیین مقادیر عرض نرونهای لایه میانی که میزان همپوشانی توابع گوسی را مشخص می کنند نیز روشهای مختلفی وجود دارد که از بین آنها به دو روش کاربردی تر اشاره می شود: در روش اول می توان متوسط فاصله اقلیدسی بین هر نرون با بردارهای دسته بندی شده در آن نرون را به عنوان عرض آن نرون انتخاب کرد و در روش دوم - که روش همگن نام دارد - از مقدار  $(\frac{k}{d^2})$  که  $k$  تعداد مراکز (نرونهای لایه میانی) و  $d$  بیشترین فاصله بین مراکز نرونهاست - استفاده می شود. لازم است ذکر شود که در روش اول هر نرون در لایه میانی می تواند یک

دلیل می توان از الگوریتمهای بهینه سازی خطی استفاده کرد که هم سرعت پردازش را بالا برده و از افتادن در چاله های موضعی - که بیشتر شبکه های پسانتشار خطا در روند یادگیری با آن سر و کار دارند - جلوگیری می شود. از نکات قابل توجه دیگر این است که در این شبکه ها چون معمولاً یک لایه به عنوان لایه میانی انتخاب می شود بنابراین نیاز به داشتن لایه های بیشتر بر طرف می شود [۲۱، ۲۰]. بدین لحاظ می توان از این شبکه برای افزایش سرعت یادگیری و حل مشکلات موجود در روش شبکه های عصبی استفاده کرد.

## ۷- تبیین مسأله

با توجه به اینکه متغیرهای تاثیرگذار بر هندسه بهینه سد  $h$  و  $\alpha$  است، بنابراین الگوهای ورودی مسأله دو عضوی بوده و به دو نرون در لایه ورودی نیاز است. با توجه به اینکه متغیرهای وابسته مسأله شیب بالادست سد و طول قاعده سد است، در نظر گرفتن دو نرون به عنوان نرونهای خروجی کفایت می کند. این ساختار در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ ساختار شبکه عصبی

با مشخص شدن ساختار لایه ورودی و خروجی، مرحله بعدی این است که تعداد لایه های مخفی و نرونهای هر لایه مشخص و سپس با آموزش شبکه طراحی شده از آن برای پیش بینی مقطع بهینه سد استفاده شود.

$$\Delta W_{(t)} = a \Delta W_{(t-1)} \quad (27)$$

که در آن  $a$  ضریب شتاب<sup>۱</sup> نام دارد.

همچنان که پیشتر ذکر شد یکی دیگر از روشهای تعیین ماتریس وزن، روش مستقیم شبه معکوس است که در آن از شیوه تجزیه ماتریس به مقادیر یکه استفاده می‌شود. این روش زمانی استفاده می‌شود که نرونها لایه خروجی دارای توابع تحریکی از نوع ساده خطی باشند. در این الگوریتم به طور مستقیم ماتریس وزنها اتصالی بین نرونها میانی و خروجی تعیین می‌شود. در هر شبکه عصبی مصنوعی می‌توان نوشت:

$$G \cdot W = d \quad (28)$$

که در آن  $G$  ماتریس خروجی نرونها لایه میانی و  $W$  ماتریس وزنها اتصالی بین نرونها لایه میانی و خروجی است که نرون بایاس نیز می‌تواند در آن قرار گیرد و  $d$  نیز بردار هدف یا مقادیر واقعی متغیر تابع است.

برای محاسبه ماتریس  $G$  از رابطه تابع گوسی استفاده می‌شود:

$$G \|x - t_i\| = \exp\left(-\frac{\|x - t_i\|^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (29)$$

که در آن  $x$  بردار الگوی ورودی و  $t_i$  بردارهای مراکز نرونهاست و  $\sigma_j$  عرض هر نرون است.

بردار  $W$  بردار وزنها اتصالی بین نرونها لایه میانی و لایه خروجی بوده و در صورتی که یک نرون خروجی وجود داشته باشد، به صورت  $W = [w_1, w_2, \dots, b]^T$  می‌باشد که در آن  $b$  مقادیر نرون بایاس است. بنابراین برای یافتن  $W$  به صورت مستقیم می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$W = G^{-1} \cdot d \quad (30)$$

اگر ماتریس  $G$  مربعی نباشد، برای معکوس کردن آن به تجزیه به بردارهای یکه نیاز داریم و به همین دلیل از

عرض داشته باشد اما در روش دوم تمام نرونها دارای عرضهای مساوی خواهند بود [۲۳].

بعد از تعیین مراکز و عرض نرونها در لایه میانی، نوبت به تعیین بردار وزنها اتصالی بین نرونها لایه میانی و لایه خروجی می‌رسد که این مرحله، آموزش با راهنما است. در این زمینه روشهای مختلفی وجود دارد: از میان روشهای معروف می‌توان به روشهای: الف- حداقل کردن مجموع مربعات خطا، ب- حداقل کردن مجموع مربعات واریانسها، ج- الگوریتم جذب نرونی و د- روشهای تحلیل شبه معکوس اشاره کرد. در روشهای حداقل کردن مجموع مربعات خطا از دو الگوریتم پس انتشار خطا و الگوریتم انتشار سریع استفاده می‌شود. به علت استفاده از الگوریتم انتشار سریع در حل مسئله حاضر، الگوریتم آن به اختصار شرح داده می‌شود.

در روش انتشار سریع که در مواردی سریعتر از روش پس انتشار خطا است، اساس کار بر یافتن مقدار بهینه فواصل مکانی در جهت حداقل کردن خطا است. به این منظور فرض می‌شود که منحنی خطای شبکه، سهمی شکل باشد و از روابط مربوط به سهمی، می‌توان به حداقل خطا رسید. در این روش بر خلاف روش پس انتشار خطا که وزنها پس از آموزش هر الگو به‌هنگام می‌شوند، در اینجا در یک چرخه، کل الگوها وارد می‌شوند و سپس میانگین خطای هر چرخه، مبنای کار قرار خواهد گرفت. الگوریتم این روش چنین است که ابتدا در چرخه اول، قانون یادگیری پس انتشار خطا اعمال و وزنها به‌هنگام می‌شوند و در چرخه‌های دوم به بعد بر طبق رابطه زیر وزنها به‌هنگام خواهند شد [۲۴]:

$$\Delta W_{(t)} = \frac{S_{(t)}}{S_{(t-1)} - S_{(t)}} \Delta W_{(t-1)} \quad (26)$$

در این رابطه  $S_t$  شیب منحنی خطا در لحظه  $t=1$ ،  $\Delta W_{(t)}$  مقادیر اصلاح وزن در زمان  $t$  و  $\Delta W_{(t-1)}$  مقادیر اصلاح وزن در زمان  $t-1$  است. چنانچه  $S_t$  با  $S_{t-1}$  برابر شود از رابطه زیر استفاده خواهد شد:

1. Acceleration Coefficient

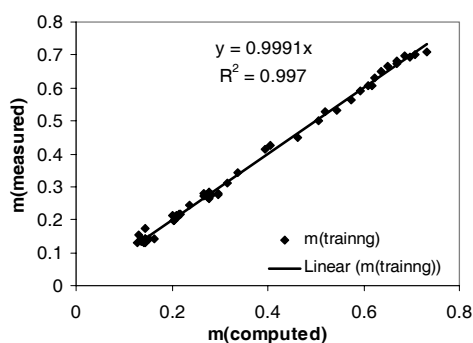
رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$W = (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot d \quad (31)$$

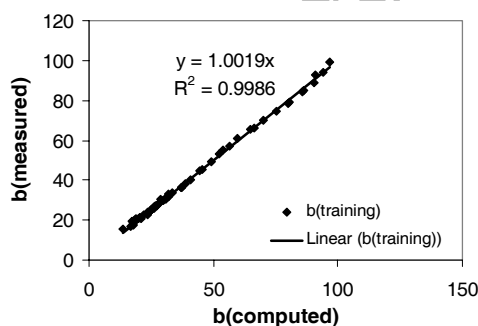
## ۱۰- نتایج آموزش و آزمون شبکه عصبی

### مصنوعی

بعد از طراحی شبکه و انتخاب ۲۱ نرون در لایه میانی اکنون شبکه قادر به تعمیم یادگیری بوده و می‌تواند برای داده‌های آزمون جوابگو باشد. با توجه به این که یادگیری شبکه عصبی با داده‌های آموزشی محقق می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود که نتایج حاصل از به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد شیب بالادست سد و طول قاعده سد با داده‌های آموزشی موافقت خوبی داشته باشد که این موضوع در شکلهای ۳ و ۴ به‌خوبی دیده می‌شود.



شکل ۳ مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیکی برای شیب جانبی (داده‌های آموزشی)



شکل ۴ مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیکی برای عرض کف (داده‌های آموزشی)

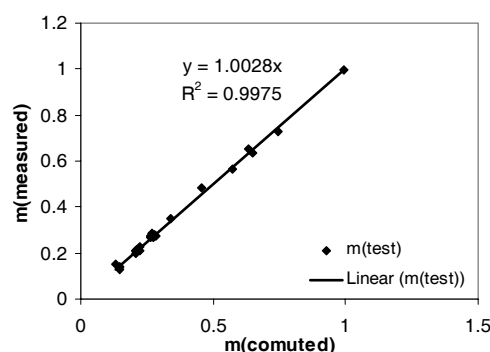
به منظور آنکه توانایی شبکه در تعمیم یادگیری مشخص شود، شبکه با داده‌های آزمون -که قبلاً شبکه با آنها مواجه نبوده- آزمایش می‌شود. در شکلهای ۵ و ۶ نتایج حاصل از

## ۹- روشگان حل مساله

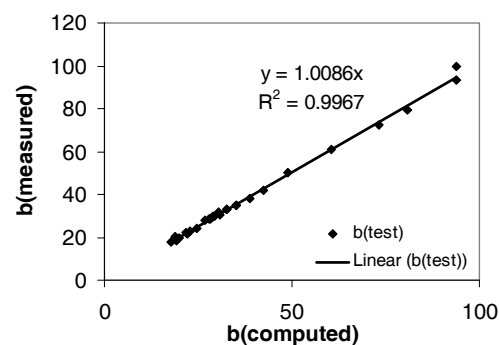
برای طراحی و آموزش شبکه عصبی، به اندازه‌گیری و یا جمع‌آوری تعداد مطلوبی از داده‌ها نیاز است. در این تحقیق، ۸۴ دسته داده از به‌کارگیری الگوریتم ژنتیکی برای مقادیر ارتفاع در محدوده ۱۶ تا ۷۵ متر و ضریب زلزله‌خیزی بین ۰/۱ تا ۰/۳ که در ایران وجود دارد، به‌دست آورده می‌شود. ابتدا این تعداد داده به دو دسته به اندازه‌های ۵۴ و ۳۰ تقسیم شده و از این ۵۴ داده، به عنوان داده‌های آموزش شبکه و از بقیه به عنوان داده‌های تست شبکه استفاده شد. نکته مهم در اینجا آن است که انتخاب داده‌ها باید به صورتی باشد که داده‌های آموزش از گستردگی و پراکندگی خوبی برخوردار باشند، تا شبکه جوابهای بهتری را نسبت به داده‌های آزمایشی به‌دست دهد. در انتخاب این الگوها به سعی و خطا نیاز است. بعد از مشخص شدن الگوهای آموزش و آزمایش، اکنون نوبت به آموزش شبکه می‌رسد. برای آموزش شبکه از نرم‌افزار STATISTICA NEURAL NETWORK استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر به آموزش شبکه توابع پایه شعاعی همراه با الگوریتمهای میانگین  $k$  و همگن برای تعیین مراکز و عرض نرونها و قوانین انتشار سریع و الگوریتم شبه معکوس برای تعیین وزنه‌های خروجی است. برای تعیین تعداد نرونها لایه میانی ابتدا با فرض چهار نرون در لایه میانی شروع به آموزش شبکه کرده و خطای آموزش و آزمایش به‌دست آورده شد. سپس با افزودن به تعداد نرونها لایه میانی، خطاها محاسبه و ثبت شد. حداقل مجموع مربعات میانگین خطا زمانی رخ می‌دهد که تعداد نرونها لایه میانی برابر ۲۱ شود که در این صورت خطای آموزش و آزمایش به‌ترتیب ۰/۰۱۴۳، ۰/۰۲۳۱ خواهد شد.

یک مسأله بهینه‌سازی مقید است که تابع هدف آن را وزن سد یا بتن مصرف شده در ساخت سد تشکیل می‌دهد و قیود آن ارضای شرایط پایداری سد در برابر لغزش-واژگونی و کنترل خستگی قائم در وجه بدنه است. با توجه به اینکه با پیچیده شدن مسائل بهینه‌سازی، استفاده از الگوریتمهای ریاضی بهینه‌سازی بسیار مشکل شده و با توجه به اینکه در این الگوریتمها بر اساس نقطه شروع در میدان حل، ممکن است به جوابهای مختلفی دست یابیم، بنابراین لزوم استفاده از روشی خبره که بتواند در نقاط مختلف فضای حل به طور موازی جستجو کند، احساس می‌شود. روش جستجوی ژنتیکی تلاشی برای شبیه‌سازی و به‌کارگیری برخی ویژگیها و تواناییهای تکامل طبیعی در حل مسائل بهینه‌سازی است. در این مقاله با معرفی تابع هدف (وزن) و توابع قید (معیارهای پایداری) برای ۱۳۰ حالت مختلف از ترکیبات ارتفاع آب در مخزن ( $h$ ) و ضریب زلزله ( $\alpha$ ) و استفاده از روش جستجوی ژنتیکی، مقادیر  $m$  و  $b$  برای هر حالت به دست آمد. مقایسه نتایج حاصل از این روش با مقادیر حاصل از تحقیقات موجود نشان می‌دهد که نتایج روش حاضر بسیار مناسبتر بوده و می‌توان از این روش در بهینه‌سازی مقاطع سدهای بتنی استفاده کرد؛ ضمن اینکه این روش به دلیل جستجوی همزمان در فضای حل، به راحتی از نقاط بهینه محلی رها شده و به نقطه بهینه جامع می‌رسد و به همین دلیل، محدودیتهای روشهای مرسوم بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتمهای ریاضی را نیز ندارد. همچنین به منظور اقتصادی‌تر شدن طرح سد، با استفاده از نتایج الگوریتم ژنتیکی و روش هوشمند شبکه عصبی مصنوعی، مقطع بهینه سد براساس پارامترهای عمق آب در مخزن و ضریب زلزله خیزی منطقه تخمین زده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیکی به خوبی می‌تواند در تخمین مقطع بهینه برای سد بتنی وزنی مورد استفاده قرار گیرد.

به‌کارگیری شبکه عصبی و نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم ژنتیکی در تخمین مقطع بهینه سد، آمده است. اگر به این اشکال دقت شود، ملاحظه می‌شود که نتایج بر روی خطی با شیب ۴۵ درجه و با ضرایب همبستگی بالایی واقع شده‌اند که نمایانگر تطابق خوب نتایج حاصل از کاربرد شبکه عصبی و نتایج آزمایشگاهی بوده و این نکته را می‌رساند که شبکه عصبی قادر است مستقل از مدل به پیش‌بینی و تخمین این عمق بپردازد.



شکل ۵ مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیکی برای شیب جانبی (داده‌های آزمایشی)



شکل ۶ مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیکی برای عرض کف (داده‌های آزمایشی)

## ۱۰- نتیجه‌گیری

طراحی بهینه مقاطع سدهای بتنی وزنی یکی از موضوعهای مهم و جذاب در مهندسی عمران است. مقطع بهینه سدها، باید علاوه بر ارضای شرایط پایداری، مقرون به صرفه نیز باشد. بنابراین مسأله تعیین مقطع بهینه سدها

## ۷- منابع

- [1] ارزیاده، ف؛ "سازسازی یا مهار آبهای سطحی"؛ انتشارات دهخدا؛ تهران؛ ۱۳۶۲؛ صص ۲۱۰-۱۸۰.
- [2] Fanelli, A.; Fanelli, M.A.; "Optimail Proportioning of Arch Gravity Dams"; *Dam Engineering*; Vol. 111; No. 4; 1992.
- [3] Fanelli, A.; Fanelli, M.; and Li, Y.; "A Neural Network Approach to the Definition of Near Optimal Arch Dam Shape"; [on line] available at: [www.ienet.it](http://www.ienet.it), 1996.
- [4] Zhu, B.; "Shape Optimization of Arch Dams for Static and Dynamic Loads"; *Journal of Structural Engineering*; Vol. 118; No. 11; November 1992.
- [5] Zhu, B. "Shape Optimization of Arch Dams", *Large Dams in China: A Fifty Year Review*; China. Water Power Press; Beijing 2000.
- [6] امامزاده، ش؛ نورزایی، ج. ا؛ "مروری بر کاربرد شبکه عصبی در تعیین هندسه بهینه سدهای قوسی"؛ مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی؛ دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ ۱۳۸۰؛ صص ۴۰-۴۸.
- [7] Holland, J; "Genetic algorithms and the optimal allocations of trials"; *SIAM Journal of Computing*, Vol 2, No. 2; pp. 88 - 105; 1973.
- [8] Harrouni, K.; Ouazar. D.; and Walters, A.H.D; "Groundwater Optimization and Parameter Estimation by Genetic Algorithm and Dual Reciprocity Boundary Element Method"; *Engineering Analysis with Boundary Elements*; Vol 18; pp. 287-296; 1996.
- [9] Gen, M; Cheng, K; "Genetic Algorithms and Engineering Design"; *John Wiley*; 1997.
- [10] Goldberg, E.D; "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning"; *Addison-Wesley*; 1989.
- [۱۱] بیرامی، م. ک؛ "سازه‌های انتقال آب"؛ مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان؛ ۱۳۷۶؛ صص ۵-۲۴.
- [12] Leliavsky, S.; "Uplift in gravity Dams"; Constable; London; 1965.
- [13] Zanger, C.N; "Hydrodynamic Pressure on Dams Due to Horizontal Earth Quake Effects"; *Engineering Monograph*; No. 11, U.S Bureau of Reclamation; 1952.
- [14] U.S.B.R; "Design of Gravity Dams" USA; Denver; 1976.
- [15] U.S.B.R; "Design of Small Dams"; USA; Denver; 1987.
- [۱۶] منتظر، غ. ع؛ دهقانی، ا. ا؛ قدسیان، م؛ "بهینه‌سازی هوشمند مقاطع سدهای بتنی وزنی روی پی‌های سنگی با استفاده از الگوریتم ژنتیکی"؛ مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس هیدرولیک؛ دانشگاه شیراز؛ ۱۳۸۲؛ صص ۱۸۵-۱۹۲.
- [۱۷] منہاج، محمد باقر؛ "مبانی شبکه‌های عصبی مصنوعی (جلد اول)"؛ مرکز نشر پروفیسور حسابی؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ ۱۳۷۷؛ صص ۳۵-۴۵.
- [18] Jam, L; Fanelli, A.M; "Recent advances in artificial neural networks design and applications"; CRC. Press; Ch5; 2000.
- [19] Broomhead, D. S; Lowe, D; "Multivariate functional interpolation and adaptive networks"; *Complex system*; pp. 321-355; 1988.
- [20] Orr, M. J. L; "Local smoothing of radial basis function networks"; In *International Symposium on Artificial Neural Networks*; Hsinchu; Taiwan; 1955.
- [21] Maillard, E. P; Gueriot, D; "RBF neural networks, basis functions and genetic algorithm"; *IEEE ASSP Magazine*; 1977; pp. 2187-2192.
- [22] Bishop, C; "Neural networks for pattern recognition"; Oxford Univ. Press; 1995.
- [23] Orr, M. J. L; "Regularization in the selection of radial basis function centers"; *neural computation*; 1995; pp. 606-623.