

بررسی عملکرد مدل‌های داده مینا در تعیین فشار دوغاب سیمانی با استفاده از روش تلفیقی آزمون گاما و الگوریتم ژنتیک (GA-GT)

سید احسان موسوی^۱؛ حسن بخشنده امنیه^{۲*}؛

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن، پردیس دانشگاه کاشان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۱

چکیده

به منظور بهبود پارامترهای ژئومکانیکی و قابلیت باربری توده سنگ بستر یا کاهش تراوایی و بهسازی شرایط بستر سدها و سازه‌های مهندسی مرتبط با زمین، تزریق دوغاب سیمانی انجام می‌شود. فشار تزریق، پارامتر تعیین‌کننده در موفقیت عملیات است به گونه‌ای که مقادیر کم یا زیاد فشار تزریق دوغاب باعث بروز خسارات مالی و زمانی و عدم موفقیت پروژه می‌شود. با توجه به گستردگی پارامترهای موثر بر فشار تزریق، تعیین فشار بهینه تزریق با استفاده از روابط تحلیلی و تجربی قبلی با خطای زیادی روبرو می‌شود، لیکن در این مقاله با کمک روش *SVR* و با استفاده از اطلاعات پروژه‌های بزرگ و موفق، فشار بهینه تزریق با میزان خطای *R* قابل قبول (بالای ۰٫۹۰) تعیین شد. همچنین با یافتن ترکیب بهینه اطلاعات ورودی با استفاده از الگوریتم ژنتیک *GA-GT*، و حذف داده‌های انحرافی میزان خطای محاسباتی به حداقل رسیده و خطای *R* به میزان تا ۳۰٪ بهبود می‌یابد. روش *SVR* با استفاده از توابع مختلف کرنل بهترین مقدار را برای پارامتر وابسته در فضای پارامترهای مستقل یافته و ارائه می‌کند.

رگرسیون ماشین بردار پشتیبان-*SVR* - فشار تزریق - دوغاب سیمان - الگوریتم ژنتیک

واژگان کلیدی

۱-مقدمه

محدوده مناسب این پارامتر در میزان اثربخشی عملیات نقش اساسی دارد. با وجود اهمیت پارامتر فشار در فرآیند تزریق، هنوز رابطه و معیار دقیقی به منظور تعیین فشار مناسب وجود نداشته است و برآورد فشار به صورت کاملاً تجربی و توسط عوامل اجرایی در کارگاه‌ها انجام می‌شود. انتخاب فشار نامناسب (کم یا زیاد) در هر حالت باعث بروز مشکلات زیاد در پروژه‌ها می‌شود. فشار پایین باعث ناکارآمدی و ناتمام ماندن عملیات و نرسیدن به هدف اصلی آن شده و بهسازی ساختگاه تکمیل نخواهد شد و به تزریق مجدد در مراحل بعدی نیاز خواهد شد. از سوی دیگر اعمال فشار بالا و در نتیجه وقوع شکست هیدرولیکی نیز باعث آسیب بیشتر توده سنگ، کاهش وضعیت کیفی آن، معکوس شدن نتیجه عملیات و عدم بهسازی مناسب ساختگاه پروژه می‌شود. هدف کلی این مطالعه تعیین محدوده بهینه‌ی اعمال فشار تزریق به منظور جلوگیری از پدیده‌ی

تزریق دوغاب سیمان یکی از روش‌های معمول در بهسازی شرایط بستر سدها و سازه‌های مهندسی مرتبط با زمین است که برای بهبود پارامترهای ژئومکانیکی و قابلیت باربری توده سنگ بستر یا کاهش تراوایی آن انجام می‌شود. همچنین در محیط‌های سنگی تزریق دوغاب به پشت پوشش بتنی تونل‌ها به منظور اتصال بهتر پوشش و زمین به کار گرفته می‌شود. تزریق در محیط‌های سنگی به دلیل نوع و مشخصات ناپیوستگی‌ها و ارتباط آنها با یکدیگر، با تزریق در خاک متفاوت است. در این روش، دوغاب تحت فشار معینی تزریق می‌شود و این مخلوط در سرتاسر بازشدگی‌ها و درزه و شکاف‌های موجود حرکت کرده و باعث کاهش اثر ناپیوستگی‌ها خواهد شد. فشار بهینه یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر نفوذ دوغاب و اثر بخش عملیات تزریق دوغاب سیمان در سنگ است. تعیین

است. علاوه بر روش‌های تجربی، مدل‌های تحلیلی نیز برای محاسبه فشار بهینه دوغاب تزریق مورد استفاده قرار گرفته است.

شکست هیدرولیکی از یک سو و نیز ممانعت از تزریق ناقص توده سنگ و عقیم ماندن عملیات از سوی دیگر است. از این رو تلاش شده است با بدست آوردن مدل بهینه برآورد فشار تزریق شرایط برای افزایش کارایی عملیات تزریق تسهیل و در نتیجه عملیات از لحاظ فنی و اقتصادی بهینه شود. تحقیقات برخی محققین در خصوص برآورد فشار دوغاب در جدول ۱ ارائه شده

جدول ۱. فهرست نظریات دانشمندان درباره نحوه انتخاب فشار تزریق

ردیف	نام محقق	سال ارائه	نظریه ارائه شده
۱	لیپالد	۱۹۵۸	مقدار فشار موثر ایمن به‌ازای هر متر روباره در حدود $16/97 \times 10^{-3}$ تا $56/56 \times 10^{-3}$ مگاپاسکال افزایش می‌یابد [3].
۲	جاگر	۱۹۶۹	متخصصین آمریکایی 0/025 مگاپاسکال به ازای هر متر روباره را پیشنهاد کرده‌اند. متخصصین اروپایی 0/1 مگاپاسکال به ازای هر متر روباره پیشنهاد کرده‌اند (4 برابر بیش‌از مورد فوق) [4].
۳	کامبرفورت	۱۹۷۷	ترس از فشار بالا منصفانه نیست. فشار تزریق باید به‌حدی باشد که درزه‌ها را از هم باز نماید [5].
۴	نانوایلر	۱۹۸۹	ایجاد شکست با بالابردن فشار، موجب افزایش نفوذ دوغاب، شعاع تزریق و در نتیجه کارایی آن خواهد شد، به همین علت فاصله گمانه را افزایش داده و از هزینه حفاری می‌کاهد [6].
۵	ویور	۱۹۹۱	روند افزایش فشار مورد استفاده در تزریق سنگ‌های درزه‌دار یا سنگ‌های ضعیف با لایه‌بندی افقی در مقاطع کم عمق، نباید از $22/62 \times 10^{-3}$ مگاپاسکال در هر متر بیشتر شود. در مواردی که در مقطع، توده سنگ‌های بزرگ و یا درزه‌های شیب‌دار وجود دارد می‌توان مقدار فشار را افزایش داد [7].
۶	گروندی	۱۹۹۵	فشار تزریق را می‌توان دو برابر وزن روباره در بالای مقطع در نظر گرفت [8].
۷	ویدمن	۱۹۹۶	به‌منظور افزایش شعاع تزریق، فشار را باید تا حد مجاز بالا برد. افزایش بیش‌از حد فشار موجب شکست هیدرولیکی خواهد شد که در اکثر موارد نامطلوب است. فشار تزریق نباید موجب باز شدن درزه‌ها از هم شود [9].
۸	استاندارد عملی هند	۱۹۹۶	تزریق نباید موجب آشفتنگی محیط شود. فشار آغازین باید در حد کم، یعنی $9/81 \times 10^{-3}$ تا $24/52 \times 10^{-3}$ مگاپاسکال به ازای هر متر روباره باشد. در صورتی که نرخ تزریق به حد 5 lit/min و یا کمتر کاهش یابد نباید، فشار افزایش یابد.
۹	مسعودی	۲۰۱۸	از میان مدل‌های تحلیلی کلی به ترتیب مدل‌های محیط الاستیک، ایروین و کراکت و همکاران دارای کمترین خطا نسبی محاسباتی بوده و بهترین برآورد از فشار تزریق را ارائه می‌دهند [13].

شکل ناخواسته‌ای نشده‌است. مشخصه‌ی اصلی شرایط اشباع، کاهش شدید دبی و تثبیت آن به علت عدم توانایی پذیرش دوغاب بیشتر توسط مقطع در نظر گرفته شده است. در واقع علت اصلی شکست یا جابجایی در سنگ مقطع و همچنین هر نوع صدمه‌ی فیزیکی مثل برخواست زمین در حین تزریق، افزایش فشار دوغاب از حد مجاز آن و عدم تحمل مقطع در برابر فشار هیدرولیکی وارد شده‌است. بر این اساس حداکثر میزان فشار قابل قبول در حین تزریق به‌عنوان فشار بهینه در نظر گرفته شده است.

با استفاده از روابط تجربی و تحلیلی موجود می‌توان مقادیر تقریبی فشار را برای شروع عملیات بدست آورد که این مقادیر عموماً با خطای بالا همراه است. در این تحقیق با استفاده از مدل هوش مصنوعی فشار بهینه تزریق با استفاده از متغیرهای تأثیرگذار با کمترین خطا محاسبه و ارائه می‌شود.

۲- روش کار

فشار تزریق در پروژه‌های مورد مطالعه از مقادیر بسیار کم آغاز و به یک مقدار بیشینه‌ی نهایی ختم شده است. انتظار می‌رود که مقطع در فشار نهایی تا حدود قابل قبولی از دوغاب، اشباع شده باشد و مقطع همچنین دچار شکست و یا تغییر

متغیرهای ورودی که همبسته می‌باشند شناخته شده و از فرآیندهای مدل‌سازی حذف می‌شوند. مقدار آستانه حذف متغیرهای چند خطی ورودی برای VIF عدد پنج است [1] در **Error! Reference source not found.** ۲ نتایج محاسبه شاخص VIF از طریق نرم افزار برای پارامترهای انتخاب شده برای هر یک از پروژه‌ها ارائه شده است.

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است بررسی کلی پارامترها نشان می‌دهد که به ترتیب عمق تزریق، عدد لوژان، بازشدگی درزه‌ها و چسبندگی نقش بسزایی در میزان فشار تزریق دارد و پارامترهای دیگر در اولویت بعدی هستند.

۸۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های بخش آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های بخش آزمون انتخاب شده‌است. در روش SVR ، یکی از اقدامات ضروری تعیین تابع کرنل مناسب است. در بسیاری از تحقیقات کارایی استفاده از انواع مختلف کرنل در حل مسائل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است و اکثر نتایج، تابع کرنل $RBFF^4$ به‌دلیل عملکرد بهتر در پیش‌بینی پارامترهای مشابه و پیچیده تر از فشار بهینه تزریق نسبت به دیگر توابع کرنل کارایی بهتر را نشان می‌دهد. به‌علاوه تابع کرنل $RBFF$ پارامترهای کمتری نسبت به سایر توابع کرنل دارد بنابراین مشکلات محاسباتی کمتری ایجاد می‌کند. در رابطه ۲ تابع کرنل RFB نشان داده شده است [1]:

$$K(x, x_i) = \exp(-\gamma \|x - x_i\|^2) \quad (2)$$

همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، برد تابع $RBFF$ بین مقادیر صفر تا یک متغیر است، که باعث سادگی بیشتر مسئله می‌شود. پارامتر γ در این کرنل باید به‌درستی انتخاب شود زیرا تغییرات γ در آموزش و میزان خطای مسئله تاثیر بسزایی دارد. به‌گونه‌ای که با کاهش آن دامنه تابع کرنل بزرگتر می‌شود یعنی به‌ازای مقادیر ورودی یکسان، با کاهش مقدار γ تعداد پاسخ برابر با صفر کمتری بدست می‌آید. به‌عبارت دیگر زمانی که تفاوت میان متغیر ورودی تابع $RBFF$ به سمت بینهایت میل‌کند مقدار تابع به سمت صفر خواهد رفت و موقعی که این فاصله صفر شود یعنی بردارهای ورودی یکسان باشند، مقدار تابع بیشینه خواهد شد.

در این مطالعه مدل هوش مصنوعی رگرسیون بردار پشتیبان^۱ (SVR) در برآورد فشار بهینه دوغاب مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت و در ادامه این مدل بهینه براساس نوع تابع کرنل و پارامترهای مربوط به آن معرفی شده است. با بدست آوردن مدل نهایی SVR تخمین مناسبی از فشار تزریق بدست آمد تا در پروژه‌های آتی عملیات با فشار مناسب و بهینه انجام شود.

۱-۲- انتخاب پارامترهای مناسب ورودی

اصولاً فشار بهینه تزریق دوغاب ناشی از برهم‌کنش فرآیندهای پیچیده و غیرخطی از قبیل خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی حاکم بر توده سنگ درونگیر، ویژگی‌های دوغاب تزریق و خصوصیات فنی و عملیاتی تزریق می‌باشد. از این رو در پروژه‌های مورد مطالعه تلاش شده است تا بیشترین مؤلفه‌های تاثیرگذار بر فشار تزریق که به سادگی قابل اندازه‌گیری و در دسترس می‌باشند در نظر گرفته شوند.

۲-۲- روش تحلیل تورم واریانس

معمولاً برای تعیین و انتخاب پارامترهای مناسب ورودی به مدل‌های داده مینا از روش آماری و روش مبتنی بر نتایج مدل‌سازی استفاده می‌شود [1]، در روش آماری از تکنیک‌های مبتنی بر سنجش وابستگی همچون تورم واریانس^۲ استفاده می‌شود که اقدام به شناسایی متغیرهای ورودی مستقل می‌کند. در روش مبتنی بر تحلیل مدل‌سازی، برای دستیابی به بهترین متغیرهای ورودی از شاخص‌های آماری از قبیل شاخص‌های هموارسازی منفرد محاسباتی در طی فرآیند آموزش مدل استفاده می‌شود. در این تحقیق پارامترهای مختلف موثر بر فشار تزریق گردآوری شده، سپس داده‌های گردآوری شده بازبینی و پالایش می‌شود و با رویکرد تحلیل تورم واریانس متغیرهای ورودی ناهمبسته انتخاب می‌شود. شاخص تورم واریانس^۳ طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود [1]:

$$VIF = \frac{1}{1-R^2} \quad (1)$$

که در آن VIF شاخص تورم واریانس و R رگرسیون متغیرها است. در این روش همبستگی هر متغیر با سایر متغیرها محاسبه می‌شود و در نهایت متغیرهایی که دارای ضریب VIF بالا هستند به‌عنوان

⁴ Radial Basis Function

¹ Support Vector Regression

² Variance Inflation

³ Variance Inflation Factor

جدول ۲. نتایج محاسبه شاخص VIF برای پارامترهای انتخاب شده برای هر یک از پروژه ها

Coefficients ^a								
Project name	Parameters	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
Sardasht dam	(Constant)	897.792	44.371		20.234	0		
	Depth	0.314	0.035	0.712	9.034	0	0.416	2.406
	Lu	-0.001	0.001	-0.06	-1.017	0.31	0.732	1.366
	Vreal	-0.015	0.009	-0.213	-1.641	0.102	0.153	6.542
	RQD	0.019	0.004	0.308	5.452	0	0.807	1.238
	W/C	0	0.001	-0.142	-1.057	0.292	0.144	6.949
	T	0.202	0.048	0.278	4.202	0	0.747	1.339
	b	0.017	0.006	0.216	2.726	0.007	0.412	2.425
Gelan Dam	(Constant)	1147.844	38.299		29.971	0		
	Depth	0.122	0.03	0.239	4.059	0	0.937	1.067
	Lu	-0.001	0.002	-0.048	-0.715	0.475	0.725	1.383
	Vreal	0.314	0.035	0.712	9.034	0	0.416	2.406
	RQD	-0.025	0.012	-0.315	-2.193	0.03	0.158	6.331
	W/C	0.004	0.001	0.739	5.016	0	0.578	2.504
	T	0.005	0.002	0.411	2.5	0.013	0.149	6.721
	b	0.02	0.006	0.205	3.541	0.001	0.972	1.029
Rodbar Dam	(Constant)	1147.844	38.299		29.971	0		
	Depth	0.02	0.006	0.205	3.541	0.001	0.972	1.029
	Lu	-0.001	0.001	-0.06	-1.017	0.31	0.732	1.366
	Vreal	-0.001	0.002	-0.048	-0.715	0.475	0.725	1.38
	RQD	-0.127	0.045	-0.24	-2.827	0.005	0.389	2.571
	W/C	0.122	0.03	0.239	4.059	0	0.937	1.067
	T	0.122	0.03	0.239	4.059	0	0.937	1.067
	b	0.217	0.071	0.262	3.055	0.003	0.379	2.62
Haraz Dam	(Constant)	1343.163	114.339		11.747	0		
	Depth	-0.049	0.09	-0.04	-0.549	0.584	0.746	1.340
	Lu	0.095	0.012	0.542	7.692	0	0.809	1.235
	Vreal	-0.025	0.012	-0.315	-2.193	0.03	0.158	6.331
	RQD	-0.004	0.004	-0.077	-1.044	0.298	0.736	1.358
	W/C	0.005	0.002	0.411	2.5	0.013	0.149	6.720
	T	0.095	0.012	0.542	7.692	0	0.809	1.235
	b	-0.003	0.02	-0.011	-0.151	0.88	0.747	1.338
Chamshir Dam	(Constant)	1172.1185	102.277		11.422	0		
	Depth	0.463	0.052	0.111	1.1185	0.2935	0.8415	1.204
	Lu	0.045	0.007	0.207	2.8625	0.0255	0.734	1.376
	Vreal	0.041	0.0105	0.2035	4.909	0.015	0.468	3.809
	RQD	-0.0385	0.0175	-0.227	-1.6985	0.159	0.446	3.877
	W/C	0.004	0.002	0.3215	2.01	0.0715	0.1345	7.517
	T	0.035	0.012	0.1135	2.7495	0.015	0.5250	4.074
	b	-0.065	0.0325	-0.1255	-1.489	0.4425	0.568	1.955
Seymareh Dam	(Constant)	1001.074	90.215		11.097	0		
	Depth	0.975	0.014	0.262	2.786	0.003	0.937	1.067
	Lu	-0.005	0.002	-0.128	-1.967	0.051	0.659	1.517
	Vreal	0.107	0.009	0.722	12.011	0	0.778	1.286
	RQD	-0.073	0.031	-0.377	-2.353	0.02	0.156	6.395
	W/C	0.003	0.002	0.232	1.52	0.13	0.12	8.314
	T	-0.025	0.012	-0.315	-2.193	0.03	0.2409	6.913
	b	-0.127	0.045	-0.24	-2.827	0.005	0.389	2.571

a. Dependent Variable: Head

V_{real} : حجم دوغاب

Lu: عدد لوزان

Depth: عمق

b: بازشدگی درزه‌ها

T: چسبندگی

w/c: میزان آب به سیمان

جدول ۳. امتیازدهی پارامترهای مستقل در تعیین فشار دوغاب به تفکیک پروژه ها

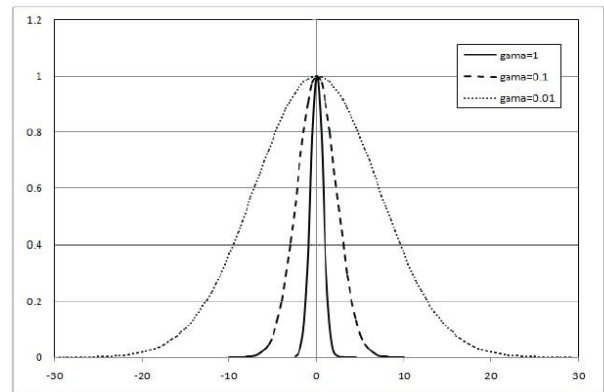
Parameters	Sardasht dam	Gelan Dam	Rodbar Dam	Haraz Dam	Chamshir Dam	Seymareh Dam	Impact rate
Depth	7	9	10	10	10	10	23%
Lu	8	8	7	9	9	8	20%
Vreal	0	7	6	0	7	9	17%
RQD	10	0	5	6	6	0	12%
W/C	0	6	9	0	0	0	12%
T	9	0	8	8	5	0	11%
b	6	10	4	7	8	7	6%

بهینه توسط تکنیک‌های اعتبارسنجی متقاطع^۱ اشاره کرد. باید توجه داشت که یافتن پارامترها به نحوی که تابع دارای کمترین خطا در زمان یادگیری باشد همواره ایده‌آل‌ترین پاسخ نمی‌باشد، بلکه یافتن تابعی با بهترین عمومیت‌پذیری، بهترین پاسخ برای تخمین تابع محسوب می‌شود که عمل اعتبارسنجی متقاطع ما را در یافتن تابعی با چنین شرایط یاری می‌کند. در صورتی که بتوان هم زمان با اعتبارسنجی متقاطع از تکنیک جستجوی مشبک^۲ نیز استفاده نشود پاسخ‌های به‌دست آمده قابلیت اطمینان بیشتری پیدا می‌کنند. با این توضیحات در این تحقیق از سعی و خطا مبتنی بر روش تلفیق تکنیک اعتبارسنجی متقاطع چندگانه با جستجوی مشبک استفاده شده است. بر این اساس، پارامترهای C, γ بهینه برای مدل رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) تعیین و نتایج نهایی برای بهترین مدل بدست آمده با ترکیب بهینه ورودی براساس خروجی حاصل در مرحله آموزش و آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج عملکرد ارائه شده است.

میزان خطای پیش‌بینی مقدار فشار تزریق با استفاده از مدل (SVR) برای داده‌های پروژه سد های مورد مطالعه مطابق جدول ۴ بدست آمده است و نمودار فشار واقعی و پیش‌بینی پروژه‌ها نیز در شکل ۲ نمایش داده شده است.

نمودار بیانگر همپوشانی مناسب اطلاعات ورودی و پیش‌بینی مدل است. اندک اختلاف موجود به دلیل رفتار پیچیده و غیر قابل پیش‌بینی زمین در برخی مقاطع خاص است. قطعاً عواملی چون تنش‌های اولیه، وجود عوامل تکتونیکی پیش‌بینی نشده، خطای انسانی و ماشین‌آلات در اجرای عملیات از جمله مواردی هستند که در اعمال و اجرای فشار تزریق نقش داشته‌اند. با این وجود و با در نظر گرفتن خطای پروژه‌ها پیش‌بینی بسیار خوبی از مقادیر فشار توسط مدل انجام شده است. اصولاً مقادیر بالای ۸۰٪ برای R نتایج بسیار خوب محسوب می‌شود.

همانگونه که در نمودارها و جداول ارائه شده مقادیر R برای همه پروژه‌ها بالاتر از ۸۰٪ بوده است و این نشان‌دهنده دقت مدل SVR در تخمین میزان فشار دوعاب بر اساس داده‌های ورودی است.



شکل ۱. تابع کرنل شعاعی Error! No text of specified style in document.

RBF به ازای مقادیر مختلف پارامتر γ

۲-۳- استانداردسازی داده‌ها

یکی از گام‌های اصلی در راستای آماده‌سازی داده‌ها برای ورود به مدل‌های هوشمند، استاندارد کردن داده‌ها می‌باشد. در استاندارد کردن، پارامترهای ورودی و خروجی به مقیاس صفر و یک استاندارد می‌شوند تا تمامی متغیرها دارای ارزش برابری شوند. چندین روش برای نرمالیزه کردن داده‌ها وجود دارد. رابطه ۳ مرسوم‌ترین روش برای دستیابی به این هدف است [1]:

$$st_i = \frac{I_i - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (3)$$

که در آن، I_i مقدار واقعی، I_{min} و I_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر هستند.

۲-۴- تعیین پارامترهای رگرسیون بردار پشتیبان

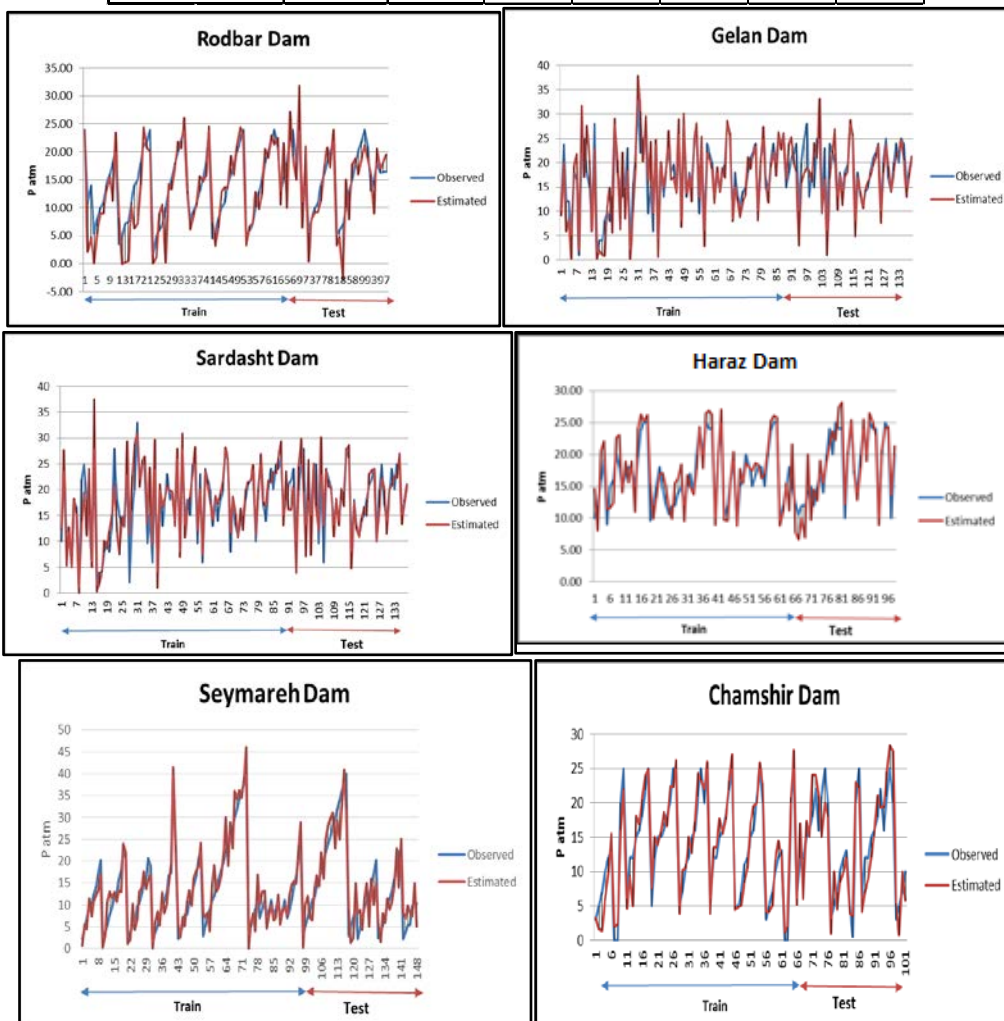
پارامترهای مدل رگرسیون بردار پشتیبان شامل C که پارامتر ظرفیت تابع محسوب می‌شود و γ مربوط به تابع کرنل مورد استفاده (RBF) است. این پارامترها می‌بایست پیش از ساخت مدل تعیین شوند. پارامتر C رابطه بین کمینه ساختن تابع خطا و پیچیدگی تابع را کنترل می‌کند. با کاهش این پارامتر پیچیدگی تابع نیز کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه کیفیت مدل SVR و قابلیت تعمیم آن به پارامترهای مدل بستگی دارد لذا انتخاب پارامترهای بهینه در ارائه مدلی کارآمد بسیار پراهمیت خواهد بود. به‌طور کلی می‌توان گفت که انتخاب C و γ می‌بایست توسط کاربر و براساس اطلاعات قبلی و یا تجربه شخصی و به‌صورت سعی و خطا انتخاب شود. بنابراین با ثابت در نظر گرفتن یک پارامتر، پارامتر دیگر را تغییر داده تا براساس کمترین مقدار MSE بهترین مقدار پارامتر انتخاب شود. اما با توجه به این‌که تعیین این پارامترها نیاز به تخصص کافی و تسلط نسبت به مسئله دارد راه‌های دیگری توسط محققین برای تعیین آن‌ها ارائه شده است. از مجموع این روش‌ها می‌توان به انتخاب مقادیر

¹ Cross Validation

² Grid Search

جدول ۴. میزان خطای پیش‌بینی مقدار فشار تزریق با استفاده از مدل (SVR) برای داده‌های پروژه‌های مورد مطالعه

Project	Optimase Parameter's		Step	Error Evaluation Criteria				
	C	γ		R	RMSE	MAE	NSE	
Gelan Dam	177	116	Train	0.8828	4.4550	3.08	0.6648	
			Test	0.8437	3.8485	2.73	0.5648	
Rodbar Dam	156	283	Train	0.8907	3.6590	2.78	0.6633	
			Test	0.8320	4.2400	3.56	0.4275	
Haraz Dam	167	182	Train	0.9059	2.4082	2.00	0.7362	
			Test	0.8699	3.0914	2.47	0.6709	
Sardasht dam	250	150	Train	0.8748	4.1534	2.98	0.7086	
			Test	0.8398	4.1530	2.86	0.4932	
Chamshir Dam		1.72	1.57	Train	0.9381	2.6347	1.97	0.8681
				Test	0.9165	2.7922	2.21	0.8338
Seymareh Dam	2.02	4.41	Train	0.9478	3.0135	2.57	0.8818	
			Test	0.8939	4.5271	4.13	0.7984	



شکل ۲. نمودار فشار واقعی و پیش‌بینی در پروژه‌های مورد مطالعه

۲-۵- آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی و انتخاب

ترکیب بهینه ورودی

یکی از عوامل ایجاد خطا در مدل داده مینا، عدم رابطه هموار بین مجموعه داده‌های ورودی و خروجی است لذا باید ترکیب بهینه ورودی تعیین شود [2]. از اقدامات مهم در استفاده از مدل‌های داده مینا، انتخاب ترکیب بهینه ورودی بر مبنای آنالیز حساسیت و تعیین اهمیت پارامترهای ورودی است. یکی از روش‌های نوین برای انتخاب ترکیب ورودی مناسب استفاده از آزمون گاما (GT) است. در آزمون گاما اگر تعداد پارامترهای ورودی زیاد باشند، علاوه بر طولانی‌تر شدن آنالیز حساسیت و برآورد اهمیت هر یک از پارامترها، تعداد فراوانی از ترکیبات ورودی وجود خواهد داشت. به طور کلی اگر N پارامتر ورودی بر وقوع پدیده‌ها موثر باشند، تعداد $2N-1$ ترکیب معنادار از پارامترهای ورودی وجود می‌آید. در این مطالعه با حداکثر ۷ پارامتر ورودی و وجود بیش از ۶۰ ترکیب معنادار، بررسی تک‌تک ترکیبات (Mask) ایجاد شد و محاسبه مقدار آماره گاما برای یافتن بهترین ترکیب کاری بسیار وقت‌گیر و غیرممکن است، لذا از تلفیق روش آزمون گاما (GT) به‌عنوان یک روش پیش‌پردازش و روش الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش بهینه‌ساز سعی شد ترکیب بهینه ورودی از میان تمام ترکیب‌های ممکن بر مبنای میزان اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی با حداقل شدن مقدار آماره گاما انتخاب شود.

۲-۶- الگوریتم ژنتیک هیبریدی (GA-GT¹)

هنگامی که عوامل موثر بر پدیده‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای زیاد باشد، ضروری است از روش‌های هیبریدی برای تعیین بهترین ترکیب از میان ترکیبات معنادار استفاده کرد. لذا پس از نرمال کردن پارامترهای ورودی مناسب، از ماهیت الگوریتم آموزش ژنتیک و

¹ Genetic Algorithm-Gamma Test

جدول ۵. پارامترهای مورد استفاده در GA-GT

پارامتر	W1	W2	W3	زمان (دقیقه)	نرخ جهش	نرخ جمعیت	اندازه جمعیت	پارامتر
مقدار	۱/۰	۰/۱	۰/۱	۵	۰/۰۵	۰/۵	۱۰۰	مقدار

تلفیق آن با آزمون گاما (GA-GT) استفاده شد تا مدل به‌طور خودکار و با کمترین زمان تمامی ترکیبات معنادار را مورد ارزیابی قرار دهد و بهترین ترکیب ورودی با کمترین مقدار آماره گاما (I) را جستجو و معرفی کند. الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک ابزار بهینه‌ساز دارای خاصیت تکاملی است و چنانچه خطای موجود در جواب به دست آمده پذیرفته نشود، الگوریتم تا رسیدن به جواب قانع کننده ادامه می‌یابد. این الگوریتم با انجام عملیات مشخص ژنتیکی نیاز به پارامترهای هم‌چون انتخاب و اندازه جمعیت^۲، نرخ ترکیب^۳ و نرخ جهش^۴ به سمت تکامل دارد که می‌بایست به الگوریتم معرفی شود. در این تحقیق، برای انتخاب بهترین ترکیب ورودی (Mask) با استفاده از الگوریتم آموزش ژنتیک از حداقل کردن تابع زیر استفاده شد [10]:

$$f(M) = 1 - ((w_1 f_1(M)) + (w_2 f_2(M)) + (w_3 f_3(M)))$$

$$f_1(M) = \begin{cases} \frac{1 - \frac{1}{1-10V_{Ratio}}}{2} & \text{if } V_{Ratio} < 0 \\ \frac{2}{2-1+V_{Ratio}} & \text{if } V_{Ratio} \geq 0 \end{cases}$$

$$f_2(M) = \begin{cases} \frac{1 - \frac{1}{1-10V_{Ratio}}}{2} & \text{if } V_{Ratio} < 0 \\ \frac{2}{2-1+V_{Ratio}} & \text{if } V_{Ratio} \geq 0 \end{cases}$$

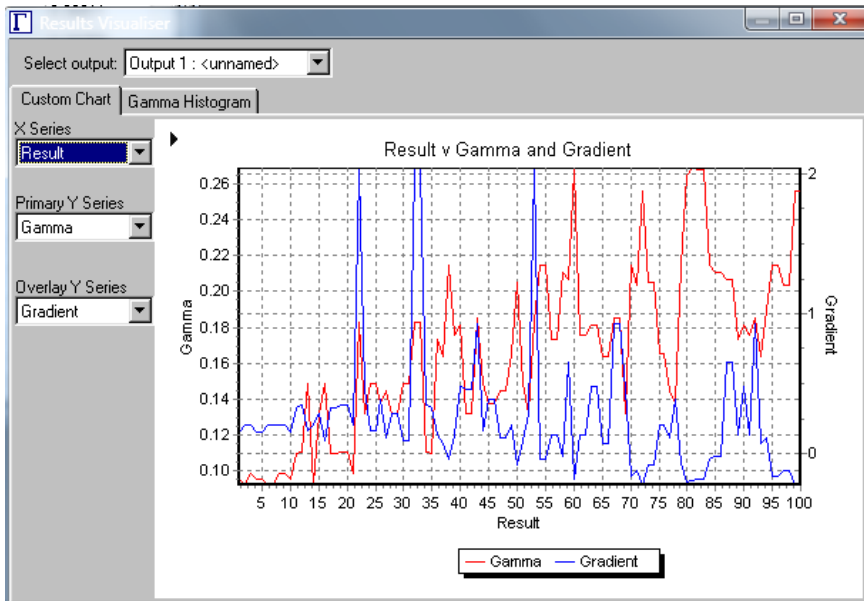
$$f_3(M) = \begin{cases} \frac{1 - \frac{1}{1-10V_{Ratio}}}{2} & \text{if } V_{Ratio} < 0 \\ \frac{2}{2-1+V_{Ratio}} & \text{if } V_{Ratio} \geq 0 \end{cases}$$

در این رابطه M تعداد ترکیب معنادار (Mask) و W وزن‌های از پیش تعیین شده است. باید دقت کرد که مجموع مقادیر W_2 ، W_1 و W_3 باید مساوی یا کمی بیشتر از یک در نظر گرفته شود [11]. مقادیر پارامترهای استفاده شده در الگوریتم ژنتیک برای مینیمم کردن تابع فوق و استخراج بهترین ترکیب معنادار با کمترین مقدار آماره گاما و V_{ratio} در جدول ۵ ارائه شده است.

² Population Size³ Crossover Rate⁴ Mutation Rate

و محتمل از پارامترهای موجود را انتخاب و نتیجه حاصل را با هم مقایسه می‌کند و در انتها ترکیب بهینه را که دارای کمترین انحراف و خطا داشته را معرفی می‌کند. در مورد پروژه سد سردشت ترکیب بهینه استفاده از پارامترهای عمق تزریق، عدد لوژان، چسبندگی دوغاب، میزان خوردن، شاخص کیفیت سنگ و بازشدگی درزه‌ها است و با خارج کردن رقوم مربوط به میزان آب به سیمان نتیجه بهتری حاصل خواهد شد.

با مینیمم کردن تابع هدف در الگوریتم ژنتیک، بهینه‌ترین ترکیب ورودی برای شبیه‌سازی فشار تزریق دوغاب بدست آمد که نتایج به‌ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. طبق این جداول، آماره گاما (I) و شاخص V_{ratio} کمترین مقدار ممکن در بین ترکیبات معنادار را دارند و نزدیک به صفر می‌باشند. برای نمونه نتیجه آنالیز تعیین ترکیب بهینه اطلاعات ورودی برای پروژه سد سردشت با استفاده از نرم افزار Win Gamma در شکل ۳ آورده شده است. این نرم افزار به تفکیک ترکیب‌های مختلف



شکل ۳. نمودار آنالیز تعیین ترکیب بهینه ورودی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

جدول ۶. نتایج اجرای روش GA-GT و ترکیب بهینه به تفکیک پروژه

Project		GT-GA Parameter's		
		Mask*	Gamma	V.ratio
1	Sardasht dam	1111101	0.094935	0.379000
2	Gelan Dam	1100011	0.000873	0.003491
3	Rodbar Dam	1101111	0.016063	0.064253
4	Haraz Dam	1110100	0.009546	0.03970
5	Chamshir Dam	1101101	0.000828	0.00334
6	Seymareh Dam	1101001	0.063013	0.25205

Mask*: [Depth, Lu, Vreal, RQD, T, W/C, b]

با در نظر گرفتن نتایج حاصل از GT-GA و استفاده از ترکیب بهینه اطلاعات، مدل SVR پیش‌بینی دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. در این راستا اطلاعات پروژه‌ها بر اساس ترکیب پیشنهادی GT-GA با استفاده از مدل SVR بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد:

و به همین ترتیب برای سایر پروژه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Win Gamma ترکیب بهینه پیشنهادی استخراج شده و در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷. نتایج ترکیب پیشنهادی GT-GA با استفاده از مدل SVR

Project	Model	Optimase Parameter's		Step	Error Evaluation Criteria			
		C	γ		R	RMSE	MAE	NSE
Sardasht dam	SVR	2.4	1.6	Train	0.8748	4.1538	2.99	0.7086
				Test	0.8398	4.1530	2.86	0.4932
	SVR-GT.GA			Train	0.9189	3.2061	2.39	0.8264
				Test	0.9083	3.0300	1.82	0.7302
Gelan Dam	SVR	1.77	1.16	Train	0.8828	4.4550	3.08	0.6648
				Test	0.8437	3.8485	2.73	0.5648
	SVR-GT.GA			Train	0.9322	3.0799	2.41	0.8398
				Test	0.9269	3.5140	1.98	0.6371
Rodbar Dam	SVR	1.56	2.83	Train	0.8907	3.6590	2.78	0.6633
				Test	0.8320	4.2400	3.56	0.4275
	SVR-GT.GA			Train	0.9310	2.5822	2.04	0.8323
				Test	0.9202	2.3734	1.87	0.8206
Haraz Dam	SVR	1.67	1.82	Train	0.9059	2.4082	2.00	0.7362
				Test	0.8699	3.0914	2.47	0.6709
	SVR-GT.GA			Train	0.9402	1.7864	1.48	0.8549
				Test	0.9371	2.0085	1.44	0.8611
Chamshir Dam	SVR	1.72	1.57	Train	0.9381	2.6347	1.97	0.8681
				Test	0.9165	2.7922	2.21	0.8338
	SVR-GT.GA			Train	0.9536	2.3539	1.99	0.8947
				Test	0.9165	3.6273	3.22	0.7195
Seymareh Dam	SVR	2.02	4.41	Train	0.9478	3.0135	2.57	0.8818
				Test	0.8939	4.5271	4.13	0.7984
	SVR-GT.GA			Train	0.9787	1.9691	1.68	0.9495
				Test	0.9478	3.2305	3.01	0.8973

روش فشار بهینه تزریق با میزان خطای R قابل قبول (بالای ۰.۹۰) تعیین شد. همچنین با یافتن ترکیب بهینه اطلاعات ورودی با استفاده از الگوریتم ژنتیک $GT-GA$ ، و حذف داده‌های انحرافی میزان خطای محاسباتی به حداقل رسیده و خطای R به میزان تا ۳۰٪ بهبود می‌یابد. با استفاده از داده‌های پروژه‌های مشابه ابتدا متغیرهای تاثیرگذار بر فشار تزریق تعیین و با استفاده از مدل بردار ماشین پشتیبان فشار بهینه محاسبه می‌شود. این بررسی نشان داد که از بین پارامترهای تعیین کننده فشار دوغاب، به ترتیب عمق تزریق، عدد لوژان، بازشدگی درزه‌ها و چسبندگی نقش بسزایی در میزان فشار تزریق دارد و پارامترهای دیگر در اولویت بعدی هستند. روش SVR با استفاده از توابع مختلف کرنل بهترین مقدار را برای پارامتر وابسته در فضای پارامترهای مستقل یافته و ارائه می‌کند.

جدول مقایسه مقادیر R ، $RMSE$ ، MAE و NSE به خوبی نشان می‌دهد که با استفاده از ترکیب مناسب اطلاعات ورودی می‌توان به نتایج بهتری برای پیش‌بینی مقدار فشار بهینه دست یافت بگونه‌ای که پارامتر R و NSE به میزان ۱۰ تا ۳۰ درصد بهبود یافته است و به همین ترتیب MAE و $RMSE$ حدود ۱۰ تا ۳۵ درصد بهبود یافته‌اند.

۳- نتایج

در این تحقیق فشار موثر در عملیات تزریق دوغاب سیمانی با استفاده از مدل بردار ماشین پشتیبان تعیین شده است تا از عواقب نامطلوب تزریق، با فشار کم یا زیاد جلوگیری شود. اعمال فشار کم باعث ناقص ماندن بهسازی و دوباره کاری و انجام مجدد تزریق می‌شود و از سوی دیگر اعمال فشار بیش از حد باعث وقوع پدیده شکست هیدرولیکی و کاهش کیفیت توده سنگ می‌شود که هر دو پدیده موجب تحمیل هزینه و اتلاف زمان خواهد بود. تعیین فشار موثر برای کارگاه‌های تزریق بسیار ضروری است. با استفاده از این

۴- منابع

- Journal.
- [15] S. Mohajerani, A. Baghbanan, R. Bagherpour, H. Hashemolhosseini, 2015, Grout penetration in fractured rock mass using a new developed explicit algorithm, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 80, Pages 412-417;
- [16] Nhat, Duc Hoang. Dieu Tien Bui. Liao Kuo. Wei. 2016. Groutability estimation of grouting processes with cement grouts using Differential Flower Pollination Optimized Support Vector Machine, *Applied Soft Computing* Volume 45, Pages 173-186;
- [17] Bazazeh D, Shubair R. 2016. Comparative study of machine learning algorithms for breast cancer detection and diagnosis. 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA); 2016 Dec 6-8;
- [18] Bakhshandeh Amnieh, H. , Masoudi, M. and Karbala, M., (2017), "Evaluating Analytical and Statistical Models in order to Estimate Effective Grouting Pressure", *Computers and Concrete, An Int'l Journal*.
- [19] Bakhshandeh Amnieh, H. and Masoudi, M., (2017), "Predicting the Occurrence of Hydraulic Fracture in Grouting Operations Based on the Pressure in the Penetrated Cement Grout", *Int. J. Mining and Geo-Engineering*.
- [۱] ریاحی مدورا، ح.، خاشعی سیوکی، ع.، سیفی، ا. ۱۳۹۶، تحلیل دقت و عدم قطعیت مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی عملکرد زعفران در خراسان جنوبی مبتنی بر داده‌های اقلیمی، *نشریه زراعت و فناوری زعفران*، جلد ۵، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶ ص. ۲۷۱-۲۵۵
- [۲] فرخ نیا، ا. مرید، س.، ۱۳۸۸. تحلیل عدم قطعیت مدل‌های شبکه عصبی و نروفازی در پیش‌بینی جریان رودخانه. *مجله تحقیقات منابع آب*، سال پنجم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۶
- [3] Leepald, E. Adachi, J. and Garagash, D. (1958). "Plane-Strain Propagation of a Fluid-driven Fracture I: Scaling and Propagation regimes. Tobe Submitted" *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*.
- [4] Jager, M.J. (1969). "Implications of Cementing on Well Performance," *Well Cementing*, E.B. Nelson (ed). Sargar Land, Texas, USA, Schlumberger 1-1-1-6
- [5] Comberfort, H. (1977). "The principles and application of grouting", *Quarterly journal of Engineering Geology*, vol. 10, pp 57-95.
- [6] Nonvieller, E. (1989). "Grouting Theory and Practice", Elsevier Science Ltd, Amsterdam.
- [7] Weaver, K. (1991). "Dam Foundation Grouting. American Society of Civil Engineers", Geo-Institute, Reston, VA, Library of Congress Catalog, Card No. 91.
- [8] Groundy, F. (1995). "The Treatment by Grouting of Permeable Foundation of Dams", *Proc. 5th cong. On larg dams*, France, pp 647-674.
- [9] Widmann, R. (1996). "International Society for Rock Mechanics-commission on Rock Grouting". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.* , Vol. 33, No. 8, pp. 803-847.
- [10] Wilson, I. Jones, A. Jenkins, D. Ware, J. 2004, Predicting Housing Value: Genetic Algorithm Attribute Selection and Dependence Modeling Utilizing The Gamma Test, *Applications of Artificial Intelligence in Finance and Economics*, No: 19, P: 243-275;
- [11] Marquez, R. Coimbra, C. F. M. 2011. Forecasting of Global And Direct Solar Irradiance Using Stochastic Learning Methods Ground Experiments and The NWS Database, *Solar Energy*, No: 85, P: 746-56;
- [12] Qiong Wang, William Sloan, Daichao Sheng, 2018, Experimental investigation of pressure grouting in sand, *Soil & Foundations*, volume 56: Page 161-173;
- [13] Bakhshandeh Amnieh, H. and Masoudi, M., (2017), "Estimating of Water Pressure to Avoid Hydraulic Fracturing in Water Pressure Test", *Computers and Concrete, an Int'l Journal*, Vol. 19, No. 2, 171-177
- [14] Bakhshandeh Amnieh, H. , Masoudi, M. and Kolahchi, R., (2017), "Pressure Analysis in Grouting and Water Pressure Test to Achieving Optimal Pressure", *Geomechanics and Engineering, An Int'l*