



تحلیل حساسیت پایداری سدهای خاکی همگن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

مجتبی حیدری

عضو هیأت علمی گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه

mojiran@gmail.com

خلاصه

در این تحقیق، حساسیت مقادیر ضریب اطمینان و مشخصات سطح لغزش دایره‌ای بحرانی سدهای خاکی همگن، در شرایط انتهایی دوره ساخت، نسبت به تغییرات عوامل موثر ارائه شده است. عوامل موثر، ارتفاع سد، عمق پی، کتانژانت زاویه شیب بالادست و پایین‌دست، عرض تاج، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بدنه و پی سد، دانسیته بدنه و پی سد و ضریب زلزله در نظر گرفته شده و متغیرهای وابسته شامل ضریب اطمینان، مختصات X و Y و شعاع دایره لغزش بحرانی می‌باشد. در این مطالعه، پس از آموزش و آزمایش یک شبکه عصبی بر اساس تحلیل‌های پایداری بوسیله برنامه CA2، برای تعیین چگونگی و مقدار تأثیر ورودی‌ها بر خروجی‌های مساله، ابتدا رابطه کلی حساسیت خروجی نسبت به ورودی برای ضریب اطمینان و مشخصات سطح لغزش بحرانی در سدهای خاکی همگن مبتنی بر شبکه عصبی چند لایه پرسپترون به دست آمده است و این رابطه برای محاسبه حساسیت خروجی‌های شبکه نسبت به ۱۲ متغیر ورودی مورد نظر، در نقاطی که در فضای ورودی به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه با تحلیل آماری مقادیر حساسیت‌ها، روندها و قوانین حاکم بر محیط مورد بحث در مورد چگونگی اثر ورودی‌های شبکه بر خروجی‌های آن و نیز اهمیت اثر هر یک از ورودی‌ها بر هر یک از خروجی‌ها استخراج شده است.

کلمات کلیدی: سد خاکی همگن، حساسیت، پایداری، پایان ساخت، شبکه عصبی

مقدمه

از آنجایی که شبکه عصبی ابزاری قوی در یادگیری رابطه ناشناخته و پیچیده بین یک فضای ورودی به فضای خروجی است، اما بر خلاف مدل‌های ریاضی به‌خودی‌خود اثر پارامترهای ورودی به خروجی و چگونگی بدست آمدن خروجی را توضیح نمی‌دهد [۱]. به همین دلیل، از آنجایی که اعتبار روش‌های هوش مصنوعی کاملاً بستگی به توضیح نتیجه به‌دست آمده دارد [۲]، مطالعات متعددی بر روی توضیح رابطه حاکم بر محیط یک شبکه عصبی و همچنین چگونگی اثر پارامترهای ورودی بر خروجی انجام شده است. لو و همکاران (۲۰۰۱) مروری بر این روش‌ها کرده‌اند. از جمله روش‌ها می‌توان از استخراج روابط حاکم، از هر کدام از نرون‌های میانی و خروجی با توجه به وزن‌ها و توابع فعالیت هر کدام از آنها [۳]، استفاده از آنالیز PCA [۴]، و استفاده از وزن‌های لایه میانی متصل به هر ورودی [۵] و همچنین استفاده از ترکیب منطق فازی با شبکه‌های عصبی برای توضیح قوانین حاکم بر شبکه عصبی آموزش دیده [۶] نام برد. لو و همکاران با بررسی این روش‌ها به این نتیجه رسیدند که اثر هر پارامتر ورودی بر روی متغیرهای خروجی از نظر مقدار و جهت در کل فضای ورودی قابل تعیین نیست. از این‌رو آنها با روشی مبتنی بر آنالیز آماری مشتق خروجی شبکه نسبت به ورودی (حساسیت خروجی به ورودی)، آنالیز حساسیتی بر روی مسأله بهره‌وری در تولید لوله‌های انتقال انجام دادند و بیان کردند که مطالعه بر روی روابط درون شبکه‌های عصبی به استفاده کننده از آن اطمینان بیشتری به قدرت پیش‌بینی شبکه می‌دهد و همچنین استفاده از این مدل‌ها را در کارهای عملی و مهندسی تسهیل می‌کند [۱]. در این تحقیق ابتدا با استفاده از یک بانک اطلاعاتی نسبتاً بزرگ که شامل ۵۱۵۱ آنالیز پایداری شیب به‌وسیله برنامه تفاضل محدود CA2 می‌باشد [۷]، پیاده‌سازی مدل شبکه عصبی با پس انتشار خطا به‌منظور پیش‌بینی و تحلیل پایداری سدهای خاکی همگن در انتهایی دوره ساخت انجام گرفت [۸]. در ادامه، از روابط شبکه برای ضریب اطمینان، مختصات X و Y و شعاع قوس لغزش بحرانی، نسبت به هریک از ۱۲ متغیر ورودی (ارتفاع سد H₁، عمق پی D، کتانژانت زاویه شیب بالادست $a_1 = \cotg \alpha_1$ و پائین‌دست a_2 ، عرض تاج H₂، چسبندگی C₁ و زاویه اصطکاک داخلی بدنه Phi₁ و پی سد C₂ و Phi₂، دانسیته بدنه Den₁ و پی سد Den₂ و ضریب زلزله K)، با استفاده از نرم‌افزار Mathematica 4 مشتق نسبی گرفته شده و حساسیت خروجی‌های شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه مبتنی بر آنالیز آماری مقادیر مشتق نسبی خروجی‌های شبکه نسبت به ورودی‌های موردنظر در ۱۰۰۰ نقطه واقع در فضای ۱۲ بعدی ورودی‌های مورد بحث می‌باشد. این نقاط به‌طور تصادفی با تابع توزیع یکنواخت در این فضا انتخاب شده‌اند.

¹ Principal Component Analysis



روش تحقیق

حساسیت خروجی نسبت به ورودی به صورت مشتق نسبی خروجی نسبت به ورودی مورد نظر تعریف می‌شود. در این تحقیق، مشتقات نسبی خروجی‌های شبکه (یعنی روابط R_s, Y, X, F_s به دست آمده از وزن‌ها، بایاس‌ها و توابع فعالیت شبکه‌های آموزش دیده نسبت به ۱۲ متغیر ورودی) نسبت به تک‌تک ورودی‌های آن محاسبه شده‌اند که به عنوان مثال $\partial F_s / \partial H_1$ ، مشتق نسبی ضریب اطمینان نسبت به ارتفاع سد می‌باشد. این گونه روابط مشتق نسبی به عنوان حساسیت مطلق خروجی نسبت به ورودی مستقل در یک مدل شبکه عصبی مبتنی بر MLP^۱ تعریف می‌شود و در واقع مقدار تغییرات قابل انتظار در خروجی نسبت به هر واحد تغییر در ورودی مورد نظر در حالی که متغیرهای دیگر ثابت نگه‌داشته می‌شوند را نشان می‌دهد [۱]. در مسائل واقعی، از آنجایی که هر ورودی دارای واحدها و حدود تغییرات متفاوت است، برای مقایسه درجه اهمیت اثر متغیرهای ورودی بر خروجی، استفاده از رابطه حساسیت مطلق مناسب نیست. به عنوان مثال اگر تغییری بین ۱ تا ۱۰۰۰۰ تغییر کند، یک واحد تغییر بسیار ناچیز است. از طرف دیگر اگر تغییری بین ۰ و ۱۰ تغییر کند، یک واحد تغییر بسیار بزرگ است. از این رو باید اصلاحی بر روی مقادیر حساسیت مطلق با توجه به حدود تغییرات آن ورودی انجام شود تا پارامتر معنی‌دارتری برای مقایسه درجه اثر ورودی‌ها بر روی خروجی بدست آید. لو و همکاران (۲۰۰۱) با ضرب مقادیر حساسیت در نسبتی از حدود تغییرات، حساسیت نسبی خروجی نسبت به ورودی را تعریف کردند [۱]. در این تحقیق با استفاده از شبکه آموزش دیده، به وسیله داده‌های نرمالیزه شده به روش خطی (Lin) و مشتق‌گیری نسبی از این شبکه، مشکل فوق حل شده است.

با توجه به رابطه مشتق نسبی خروجی‌های شبکه نسبت به هر یک از ورودی‌ها، و تأثیر تمام ورودی‌ها بر مشتق نسبت به یک ورودی خاص، مشخص است که نمی‌توان به مقدار مشتق در یک نقطه از فضای ورودی به عنوان نشان‌دهنده حساسیت خروجی به ورودی تکیه کرده و نیاز به یک آنالیز آماری مقادیر مشتق نسبی مبتنی بر تعداد کافی نقاط در فضای ورودی است. از این رو، در بانک اطلاعاتی مدل و در فضای ۱۲ بعدی ورودی‌ها، ۱۰۰۰ نقطه به‌طور تصادفی با توزیع یکنواخت انتخاب شده‌است. در هر کدام از این نقاط که دارای مقادیر ورودی مربوط به خود می‌باشد، مقادیر مشتق نسبی ضریب اطمینان، مختصات X ، مختصات Y مرکز و شعاع R دایره لغزش بحرانی محاسبه شده‌اند. مقادیر میانگین حساسیت‌های نسبی فوق در جدول ۱ دیده می‌شود. همانگونه که انتظار می‌رود مشتق نسبی هر خروجی نسبت به هر ورودی در نقاط فضای ورودی مقادیر متفاوتی دارد.

جدول ۱- مقادیر میانگین حساسیت‌های نسبی

	Input	Output			
		F_s	X	Y	R
Relative Mean	H_2	0.0001	-0.0325	0.0276	0.0257
	Den_2	0	-0.0105	0.0034	0.0055
	Phi_2	0.0003	-0.0705	0.0126	0.0035
	C_2	0.0054	-0.0444	0.0117	0.0422
	Den_1	-0.0326	0.0592	0.0062	0.0162
	Phi_1	0.0844	0.0773	0.0446	0.0263
	C_1	0.1164	-0.0377	-0.0299	-0.0041
	a_2	-0.0008	-0.0018	-0.036	0.0021
	a_1	0.0702	0.2379	0.1925	0.2208
	D	0.0134	0.0671	0.0077	0.021
	K	-0.0664	0.0366	0.0835	0.082
	H_1	-0.1638	0.6459	0.4791	0.5113

برای تحلیل و توضیح این تفاوت، اگر توزیع مقادیر مشتق در حالت واقعی در دسترس باشد می‌توان این توزیع را با توزیع واقعی مقایسه کرده بدین وسیله مدل را ارزیابی کرد، اما در واقعیت با توجه به پیچیدگی مسائل مهندسی و فاکتورهای درگیر، این توزیع در دسترس نیست. علاوه بر این در واقع یکی از دلایل استفاده از شبکه عصبی در حل مسائل مهندسی به‌جای مدل‌های ریاضی مرسوم، مشخص نبودن تأثیر متغیرها در شرایط متفاوت بر روی پارامترهای خروجی است [۱]. به‌عنوان پارامتری دیگر، مقدار میانگین حساسیت‌ها نیز می‌تواند به عنوان نشان‌دهنده برآیند اثر ورودی به خروجی مد نظر باشد. البته مقایسه میانگین نیز به مانند مقادیر حساسیت باید نسبی در نظر گرفته شود تا قابل مقایسه با مقادیر میانگین ورودی‌های دیگر باشد. اما استفاده از مقادیر میانگین می‌تواند در بعضی موارد گمراه کننده باشد. به عنوان مثال برای یک متغیر ورودی در ۵۰٪ نقاط فضای ورودی مقادیر حساسیت، مقادیر بزرگ مثبت و در ۵۰٪ نقاط فضای ورودی، مقادیر حساسیت مقادیر بزرگ منفی است. مقدار میانگین حساسیت حدود صفر شده،

¹ Multi-Layer Perceptron



نتیجه گرفته می‌شود که این متغیر بر روی خروجی تأثیر چندانی ندارد. در حالی که ممکن است در بخشی از فضای ورودی، متغیر تأثیر کاهشی زیاد و در بخش دیگر، تأثیر افزایشی قابل توجه داشته باشد. از این رو نمی‌توان به مقدار میانگین به عنوان شاخص اولیه نشان دهنده حساسیت خروجی نسبت به ورودی تکیه کرد. با توجه به مطالب گفته شده و متغیر بودن مقادیر حساسیت، برای تحلیل حساسیت، نیاز به روشی است که پراکندگی و احتمال وقوع مقادیر مختلف حساسیت خروجی نسبت به یک ورودی را در فضای ورودی به‌طور همزمان نشان دهد. با این هدف از روش آنالیز درصدهای آماری مقادیر حساسیت نسبی که توسط لو و همکاران (۲۰۰۱) بکار گرفته شد استفاده شده است [۱]. در این روش پنج درصد آماری (D90, D75, D50, D25, D10) مقادیر حساسیت نسبی خروجی‌ها نسبت به ورودی مورد نظر محاسبه می‌شود. به‌وسیله این روش می‌توان اثر افزایش یا کاهش هر ورودی را به خروجی و روند کلی حاکم در کل فضای ورودی بر اساس نمونه‌های تصادفی گرفته شده تعیین کرد. توضیح و تعریف نتایج بدست آمده از این روش به شرح زیر است:

D10 نشان‌دهنده مقداری برای حساسیت نسبی است که ۹۰٪ مقادیر از آن بیشتر و ۱۰٪ از آن کمتر هستند. بنابراین اگر مثبت شود نشان می‌دهد که احتمال اینکه مقدار حساسیت نسبی مثبت باشد بالای ۹۰٪ است یا به عبارتی احتمال اینکه خروجی با افزایش ورودی مورد نظر، اضافه شود بالای ۹۰٪ است.

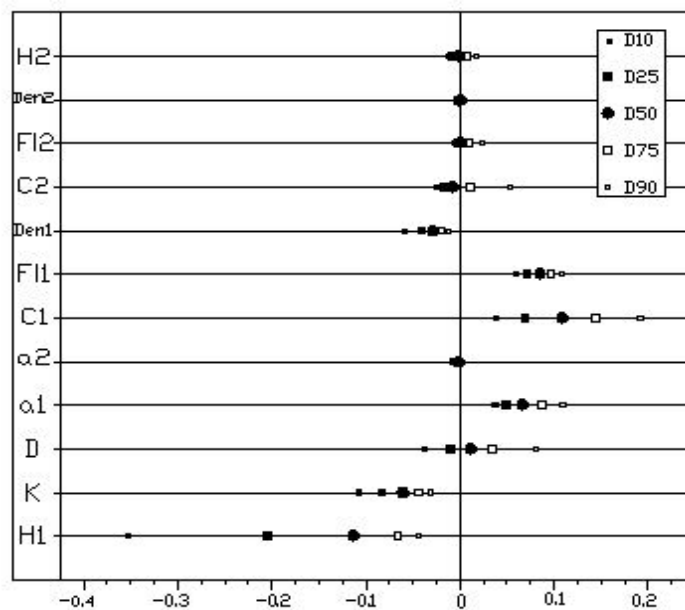
D90 نشان‌دهنده مقداری برای حساسیت نسبی است که ۹۰٪ مقادیر از آن کمتر است، بنابراین اگر منفی باشد نشان می‌دهد که به احتمال بالای ۹۰٪، خروجی با افزایش ورودی مورد نظر کاهش می‌یابد.

توضیح D25 و D75 مانند D10 و D90 است. اگر D50 بر روی خط پایه (حساسیت صفر) باشد نشان می‌دهد که احتمال اینکه با افزایش ورودی، خروجی افزایش یا کاهش پیدا کند، ۵۰٪ است.

ورودی که دارای پخش مقادیر درصدهای حساسیت نسبی حول خط پایه باشد، دارای اثری کمتر بر روی خروجی نسبت به ورودی است که دسته درصدهای حساسیت نسبی آن دورتر از خط پایه است. بدین ترتیب با توجه به فاصله دسته و مقادیر درصدهای آماری می‌توان درجه تأثیر هر متغیر را بر خروجی مطالعه کرد و اثر آنها را با هم مقایسه نمود.

آنالیز حساسیت

با توجه به شکل ۱ که شامل درصدهای آماری حساسیت نسبی متغیرهای ورودی برای ضریب اطمینان می‌باشد، لازم به ذکر است که، نزدیک بودن مقادیر درصدهای آماری حساسیت نسبی یک متغیر ورودی (D90, D75, D50, D25, D10) به یک عدد ثابت، بیانگر تغییرات ثابت تابع مورد نظر ($f(X_1, X_2, \dots, X_n)$) نسبت به متغیر مورد نظر (X_1) در فضای مورد بررسی می‌باشد، یعنی با قطعیت بالایی (بیش از ۹۰٪) می‌توان گفت که نقش متغیر X_1 در تغییرات تابع f ، مستقل از سطوح خود متغیر X_1 و نیز مستقل از تغییرات دیگر متغیرهای ورودی می‌باشد. به عبارت دیگر متغیر X_1 در تغییرات تابع f ، با متغیرهای دیگر فضای ورودی اندرکنش ندارد و می‌توان با اطمینان بیشتری در انتخاب مقادیر طراحی این متغیر (X_1) تصمیم گرفت. برای مثال در این مورد می‌توان نقش زاویه اصطکاک و چگالی بدنه سد (Den₁, Fi₁) در مقدار ضریب اطمینان را نام برد (شکل ۱) که مقادیر درصدهای آماری آنها تمرکز خاصی در اطراف یک عدد ثابت پیدا کرده‌اند.

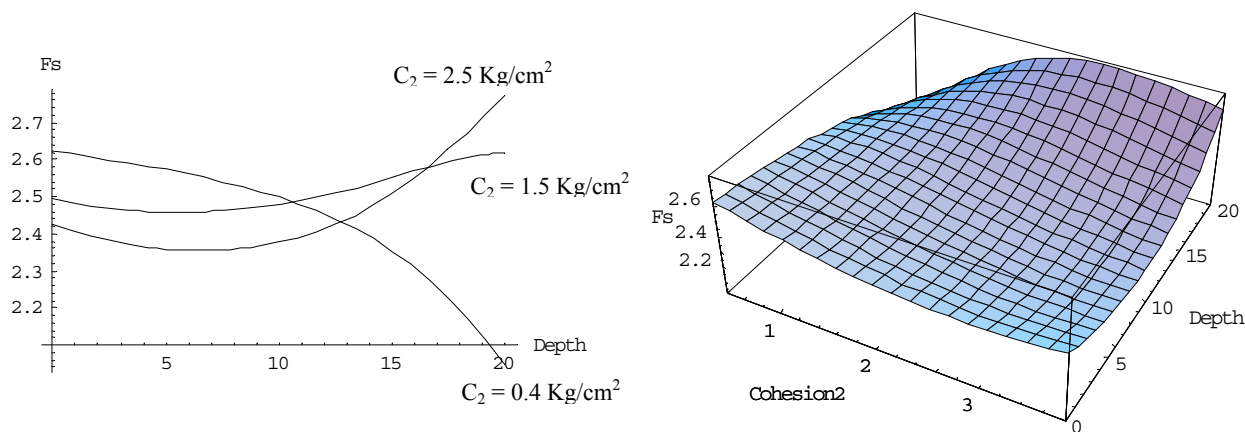


شکل ۱ - نتایج آنالیز حساسیت ضریب اطمینان (Fs) نسبت به فضای ورودی

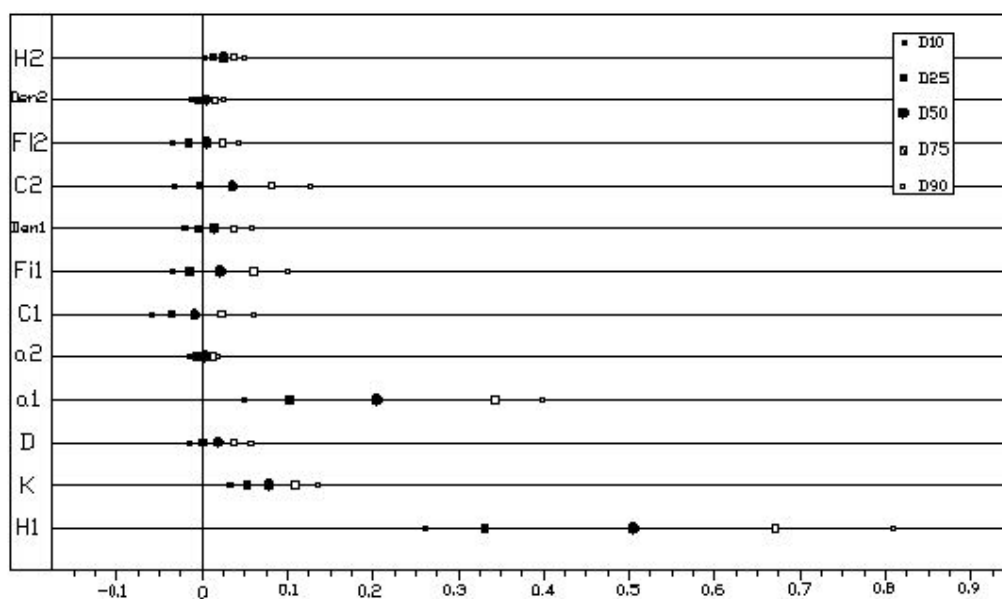


در مقابل این حالت، پراکنده بودن مقادیر درصدهای آماری حساسیت نسبی، بیانگر آن است که تغییرات تابع موردنظر $(f(X_1, X_2, \dots, X_n))$ نسبت به متغیر X_1 ، روند کاهشی یا افزایشی ثابتی نداشته و در بازه‌های مختلف فضای n متغیره ورودی، متفاوت می‌باشد، و این بدان معنی است که نقش متغیر X_1 در تغییرات تابع f ، مستقل نبوده و به مقادیر متغیرهای دیگر و تغییرات آنها و یا سطوح خود متغیر X_1 وابسته می‌باشد. در این حالت برای تصمیم‌گیری در مورد مقادیر طراحی متغیر X_1 باید دقت بیشتری مبذول گردد و نقش پارامترهای ورودی دیگر و یا احتمالاً سطوح مختلف خود متغیر X_1 ، در نظر گرفته شود. برای مثال در این مورد می‌توان نقش چسبندگی بدنه و ارتفاع سد خاکی همگن (H_1, C_1) در مقدار ضریب اطمینان (شکل ۱) را نام برد که مقادیر درصدهای آماری $(D90, D75, D50, D25, D10)$ مربوط به این متغیرهای ورودی بطور کاملاً مثبت یا کاملاً منفی ولی پراکنده می‌باشند.

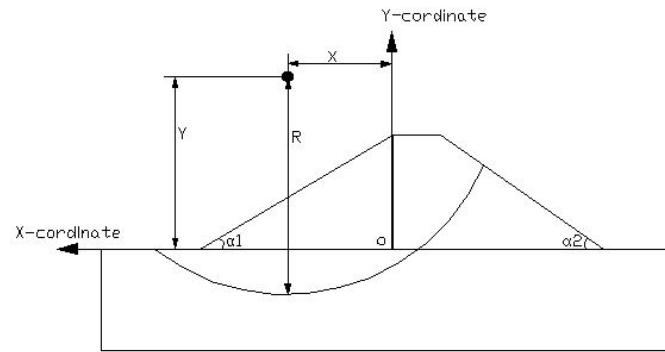
این امر یعنی پراکنده‌گی و یا تجمع مقادیر درصدهای آماری حساسیت نسبی، حول یک مقدار ثابت، هنگامی که این پراکنده‌گی و یا تجمع، حول خط پایه صفر (حساسیت صفر) باشد، بیشتر اهمیت می‌یابد، بدین ترتیب که، تجمع حول خط پایه صفر، نشانگر صفر شدن مشتق $(\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} = 0)$ در تمام فضای متغیرهای ورودی و بی‌تأثیر بودن تغییرات X_1 بر روی تابع f می‌باشد. در عین حال، پراکنده‌گی این مقادیر، حول خط پایه صفر، نشان می‌دهد که متغیر X_1 در بعضی سطوح خود و یا متغیرهای دیگر، تأثیر افزایشی بر تابع f دارد و در بعضی سطوح دیگر خود (احتمالاً) و یا متغیرهای دیگر، تأثیر کاهشی بر روی تابع f خواهد داشت. از این‌رو پیدا کردن اندرکنش بین متغیر X_1 با متغیرهای دیگر در تأثیر بر تابع f ، و در نظر گرفتن این اندرکنش در مقادیر طراحی متغیرهای ورودی، امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. برای مثال در این مورد می‌توان تأثیر عمق و چسبندگی پی سد (C_2, D) را بر مقدار ضریب اطمینان (شکل ۱ و ۲) نام برد.



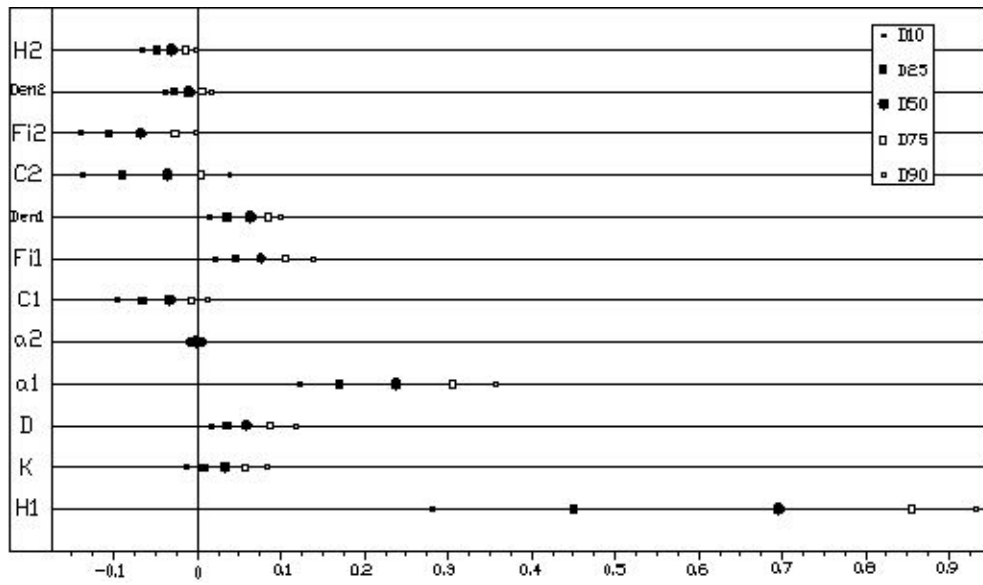
شکل ۲ - نمودار اندرکنش C_2 و D بر F_s



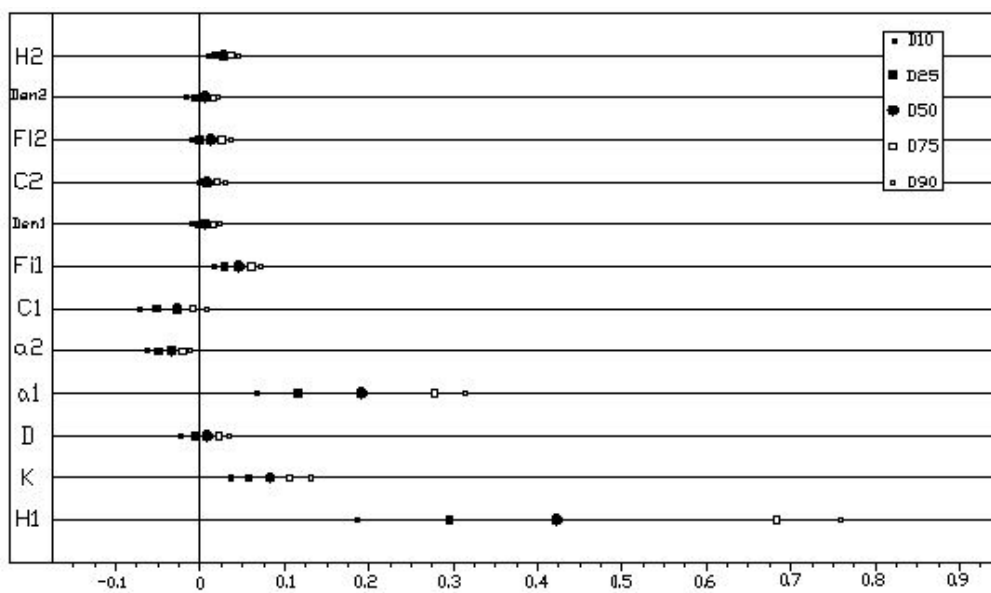
شکل ۳ - نتایج آنالیز حساسیت شعاع (R) دایره لغزش بحرانی نسبت به فضای ورودی



شکل ۴ - مشخصات دایره لغزش بحرانی (R, Y, X)



شکل ۵ - نتایج آنالیز حساسیت مختصات X مرکز دایره لغزش بحرانی نسبت به فضای ورودی



شکل ۶ - نتایج آنالیز حساسیت مختصات Y مرکز دایره لغزش بحرانی نسبت به فضای ورودی

**بحث و نتیجه‌گیری**

با توجه به شکل‌های ۱ تا ۶ و بر اساس آنالیز آماری حساسیت‌های نسبی متغیرهای خروجی شبکه عصبی، روندهای غالب ذیل برای فضای متغیرهای ورودی و خروجی به دست آمد:

- به احتمال بالای ۹۰٪، افزایش ارتفاع سد و ضریب زلزله باعث کاهش مقدار ضریب اطمینان و افزایش مقادیر مختصات X ، Y و شعاع (R) دایره لغزش بحرانی می‌شود و یا تغییر زیادی در مقدار مختصات X در اثر افزایش ضریب زلزله رخ نمی‌دهد. همچنین با افزایش کتانژانت زاویه شیب بالادست، مقادیر ضریب اطمینان و مختصات X ، Y مرکز دایره لغزش بحرانی و نیز شعاع آن به احتمال بالای ۹۰٪ افزایش می‌یابد.

- به احتمال بالای ۹۰٪، افزایش در مقادیر زاویه اصطکاک بدنه سد موجب افزایش مقادیر ضریب اطمینان و مختصات X ، Y مرکز دایره لغزش بحرانی می‌شود، و نیز افزایش عرض تاج موجب کاهش X و افزایش Y ، R به احتمال بالای ۹۰٪ می‌شود. همچنین با افزایش در مقادیر عمق پی و وزن مخصوص بدنه سد، مقادیر X و R به احتمال بالای ۹۰٪ افزایش می‌یابند و یا تأثیری در مقادیر R بوجود نمی‌آید.

- به احتمال بالای ۹۰٪ چسبندگی بدنه سد موجب افزایش ضریب اطمینان و کاهش مختصات X ، Y مرکز دایره لغزش شده و یا بر مقادیر X و Y بی‌تأثیر است. با افزایش مقادیر چسبندگی پی سد به احتمال بالای ۹۰٪ مقدار X کاهش می‌یابد و مقادیر Y ، R افزایش می‌یابند و یا تأثیر محسوسی در مقادیر X ، R رخ نمی‌دهد. همچنین به احتمال بیش از ۹۰٪ افزایش زاویه اصطکاک پی بر روی مختصات X تأثیر افزایشی داشته و نیز افزایش کتانژانت زاویه شیب پایین‌دست بر روی مختصات Y تأثیر کاهشی خواهد داشت.

- به احتمال بیش از ۷۵٪، افزایش وزن مخصوص پی موجب کاهش X و افزایش زاویه اصطکاک پی موجب افزایش Y ، و نیز افزایش زاویه اصطکاک بدنه سد موجب افزایش R شده و یا تغییرات این پارامترها، تأثیرات قابل توجهی بر مقادیر X ، Y و R نخواهد داشت.

- به احتمال بالای ۹۰٪، افزایش وزن مخصوص بدنه سد باعث کاهش مقدار ضریب اطمینان می‌شود. در این مورد لازم به ذکر است که کاهش ضریب اطمینان پایداری در اثر افزایش وزن مخصوص بدنه سد، بدون در نظر گرفتن افزایش مقاومت خاک، حاصل شده و فرض بر این است که از یک خاک سنگین‌تر استفاده شود، در حالی که در ساخت سدهای خاکی با تراکم خاک و بالا رفتن وزن مخصوص، مقاومت خاک نیز افزایش می‌یابد.

- به احتمال ۹۰٪ می‌توان گفت که تغییرات عرض تاج سد، زاویه شیب پایین‌دست، زاویه اصطکاک و وزن مخصوص پی بر مقدار ضریب اطمینان؛ تغییرات شیب پایین‌دست بر مختصات X ؛ تغییرات پارامترهای عمق پی، وزن مخصوص بدنه و پی سد بر روی مختصات Y ؛ و تغییرات وزن مخصوص پی و شیب پایین‌دست بر روی شعاع دایره لغزش شیب بالادست بی‌تأثیر هستند و یا در صورت وجود، تأثیرات آنها کوچک و جزئی خواهد بود.

- عمق پی و چسبندگی پی در یک سد خاکی همگن با یکدیگر اثر متقابل دارند و اثر تغییرات هر یک بر مقدار ضریب اطمینان بستگی به مقدار دیگری دارد به طوری که در مقادیر کم چسبندگی پی، افزایش عمق پی تأثیر کاهشی بر ضریب اطمینان دارد و در مقادیر زیاد چسبندگی پی، با افزایش عمق پی مقدار ضریب اطمینان افزایش محدودی داشته و یا تغییر نمی‌کند (شکل ۲).

- دو متغیر چسبندگی بدنه سد و زاویه اصطکاک پی، بطور مستقل بر روی مقادیر شعاع دایره لغزش بحرانی تأثیرگذار نیستند، بلکه تأثیر آنها بستگی به سطوح عامل‌های دیگر دارد و در مطالعه اثر این دو پارامتر بر روی شعاع R باید اندرکنش عامل‌های دیگر را با آنها در نظر گرفت.

- در مقایسه اثر متغیرهای مؤثر بر ضریب اطمینان شیب بالادست نسبت به هم، بر اساس بیشترین تأثیر می‌توان به ترتیب، ارتفاع سد، چسبندگی بدنه، زاویه اصطکاک بدنه سد، شیب بالادست، ضریب زلزله و وزن مخصوص بدنه سد را نام برد.

- در مقایسه متغیرهای مؤثر بر مختصات X نسبت به هم، بر اساس بیشترین اثر می‌توان به ترتیب ارتفاع سد، شیب بالادست، زاویه اصطکاک بدنه و زاویه اصطکاک داخلی خاک پی، عمق پی، وزن مخصوص بدنه سد، چسبندگی پی، چسبندگی بدنه، ضریب زلزله، عرض تاج سد و وزن مخصوص پی را نام برد.

- در مقایسه پارامترهای مؤثر بر مختصات Y مرکز سطح لغزش شیب بالادست سد، به ترتیب اهمیت تأثیر می‌توان ارتفاع سد، شیب بالادست، ضریب زلزله، زاویه اصطکاک بدنه، شیب پایین‌دست، چسبندگی بدنه، عرض تاج، زاویه اصطکاک و چسبندگی پی را نام برد.

- به ترتیب اهمیت اثر پارامترهای ورودی بر روی R می‌توان ارتفاع سد، شیب بالادست، ضریب زلزله، چسبندگی پی، زاویه اصطکاک بدنه، عرض تاج، عمق پی و وزن مخصوص بدنه سد را نام برد.

در نهایت با مقایسه پارامترهای مؤثر بر خروجی‌های شبکه مورد بررسی دیده می‌شود که:

۱- ارتفاع سد، با بیشترین تأثیر قابل توجه کاهشی بر روی ضریب اطمینان و اثر افزایشی بر مشخصات سطح لغزش بحرانی (R, Y, X)، نقشی کاملاً مؤثر بر پایداری یک سد خاکی همگن دارد.

۲- پس از ارتفاع سد، دومین عامل مهم مؤثر (با تأثیر افزایشی) بر مشخصات سطح لغزش بحرانی شیب بالادست، کتانژانت زاویه شیب بالادست است که در مورد ضریب اطمینان، دومین عامل مهم مؤثر بر آن چسبندگی بدنه سد می‌باشد.

مقایسه بین روندهای کلی به دست آمده از آنالیز حساسیت انجام شده، علاوه بر اینکه می‌تواند برای ارزیابی مدل شبکه عصبی به کار رود، با روشن کردن نحوه عملکرد مدل و چگونگی اثر پارامترهای ورودی بر خروجی موجب گسترش کاربرد چنین مدل‌هایی در کارهای عملی مهندسی می‌گردد.



مراجع

1. Lu, M., Abourizk, S. M. & Hermann, U. H. (2001) Sensitivity analysis of neural networks in spool fabrication productivity studies, *J. Comp. In Civ. Eng.*, Vol. 15, No. 4, **10**, 299–308
2. Widham, L. E. & Loparo, K. A. (1989) *Artificial intelligence, simulation and modeling: Critical survey*, *Artificial intelligence, simulation and modeling*, L. E. Widman, K. A. Loparo & N. R. Nielsen eds., Wiley, **45**, 1–45
3. Li, Y., Shen, L. Y. & Love, P. E. D. (1999) ANN based mark-up estimation system with self-explanatory capabilities, *J. Constr. Eng. and Mgmt.*, ASCE, Vol. 125, No. 3, **5**, 185–189
4. Sinha, S. K. & Mckin, R. A. (2000) Artificial neural network for measuring organizational effectiveness, *J. Comp. In Civ. Eng.*, ASCE, Vol. 14, No. 1, **6**, 9–14
5. Knowles, P. (1997) *Predicting labor productivity using neural networks*, MSc thesis, University of Alberta, Edmonton, Canada
6. Sayed, T. & Razavi, A. (2000) Comparison of neural and conventional approaches to mode choice analysis, *J. Comp. In Civ. Eng.*, ASCE, Vol. 14, No. 1, **8**, 23–30
۷. فخریمی، احمدعلی (۱۳۷۷) *تئوری و راهنمای نرم‌افزار CA2 در تحلیل محیط‌های پیوسته*، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (نشریه ۲۶۲)
۸. حیدری، مجتبی (۱۳۸۴) *پایداری سدهای خاکی همگن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی*، مجموعه مقالات دومین کنگره ملی مهندسی عمران (گرایش ژئوتکنیک)، دانشگاه علم و صنعت ایران، **۹**، ۶۲–۷۰
9. Sandberg, G. & Olsson, A. (1999) Failure sensitivity analysis of engineering structures, *Computers and Structures*, 72, **10**, 525-534