



بررسی طبقه‌بندی نوع خاک با استفاده از منطق فازی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰

هاله مشگین قلم، مهرداد امامی تبریزی*، محمدرضا چناقلو

دانشکده مهندسی عمران و مرکز تحقیقات زلزله دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۷
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۳
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۳۰

کلمات کلیدی:

طبقه‌بندی نوع زمین
استاندارد ۲۸۰۰
عدم قطعیت
روش‌های احتمالاتی
سیستم استنتاج فازی (FIS)

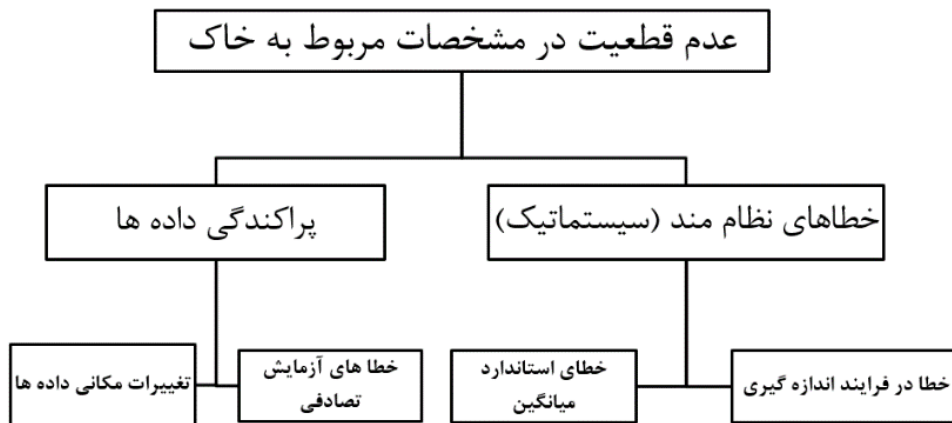
خلاصه: طبقه‌بندی نوع زمین ساختگاه به منظور طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله تابعی از وضعیت لایه‌های خاکی و سنگی زمین منطقه است که مطابق آیین‌نامه‌های معتبر مربوطه، خود تابعی از پارامترهای مکانیکی و دینامیکی خاک می‌باشد. به طوری که این پارامترها بر اساس متوسط سرعت موج برشی، متوسط عدد نفوذ استاندارد و متوسط مقاومت برشی زهکشی نشده در خاک‌های چسبنده در لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۳۰ متری از تراز پایه تعیین می‌گردند. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای مذکور و نیز در نظر گرفتن این مسئله که مقادیر این پارامترها در توده‌ی واقعی با مقادیر حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی به دلیل خطاهای موجود متفاوت است، لذا تعیین دقیق پارامترهای مذکور مستلزم به کارگیری روش‌های آماری و احتمالاتی می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های محاسباتی روش‌های آماری و احتمالاتی، در این تحقیق از سیستم استنتاج فازی جهت تصمیم‌گیری در انتخاب نوع زمین، استفاده گردیده است که قادر به در نظرگیری عدم قطعیت‌ها بدون نیاز به محاسبات پیچیده‌ی ریاضی می‌باشد. بدین منظور، پس از تعیین پارامترهای موثر در تعیین نوع خاک، توابع عضویت مثلثی برای آن‌ها انتخاب و در نهایت سیستم استنتاج فازی طراحی می‌شود. با توجه به نتایج، ملاحظه می‌شود که مدل پیشنهادی در مرزهای بین دو نوع طبقه متوالی خاک، پاسخ دقیق‌تری نسبت به استاندارد ارائه می‌دهد. همچنین زمانی که مقادیر پارامترهای موثر در انتخاب نوع زمین به دور از مرزهای بین طبقات متوالی خاک قرار می‌گیرند، سیستم استنتاج فازی و استاندارد ۲۸۰۰ جواب‌های یکسانی ارائه می‌دهند.

۱- مقدمه

مکانی پارامترهای مقاومتی به عنوان مهم‌ترین منشا عدم قطعیت در نظر گرفته می‌شود. با این وجود تحقیقات زیادی نشان می‌دهد که منابع دیگری ممکن است سطوح بالاتری از عدم قطعیت را داشته باشند [۷]. کریستین^۱ و همکاران نشان دادند که عدم قطعیت مربوط به پارامترهای خاک مطابق شکل ۱ در اصل به دو گروه عمده خطاهای ناشی از پراکندگی داده‌ها و خطاهای اندازه‌گیری تقسیم می‌شوند. پراکندگی داده‌ها به علت تغییرات مکانی داده‌ها و نیز خطاهای آزمایش‌ها بوده و همچنین خطاهای نظام‌مند (سیستماتیک) مربوط به خطاهای آماری (به علت انجام تعداد محدودی آزمایش، خطای نظام‌مند (سیستماتیک) در مقدار میانگین محاسبه شده، ایجاد می‌شود) و نحوه اندازه‌گیری می‌باشند [۸]. تحلیل احتمالاتی روش مفیدی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها بوده و درک بهتری از تحلیل قابلیت اعتماد در مقایسه با روش مرسوم تحلیل قطعی به ما می‌دهد [۹] و [۴] و [۵] ولی به لحاظ زمان‌بر بودن، از نظر مهندسی، کاربردی نیست [۸].

طبقه‌بندی نوع زمین ساختگاه تابعی از پارامترهای مکانیکی و دینامیکی لایه‌های خاک منطقه می‌باشد که مطابق آیین‌نامه‌های معتبر طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله همچون آیین‌نامه‌های اروپا، آمریکا و ایران (استاندارد ۲۸۰۰)، خود تابعی از متوسط سرعت موج برشی در لایه‌های مختلف خاک، متوسط عدد نفوذ استاندارد در لایه‌های مختلف خاک و متوسط مقاومت برشی زهکشی نشده در خاک‌های چسبنده در لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۳۰ متری از تراز پایه است [۱-۳]. عدم قطعیت در پروژه‌های ژئوتکنیکی از تغییرات مشخصه‌های فیزیکی خاک‌ها، خطای حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و درجا، کوچک بودن نمونه آزمایشگاهی در مقایسه با حجم واقعی توده خاک (حجم نمونه خاک مورد بررسی حاصل از گمانه‌ها حدود 10^{-6} تا 10^{-9} حجم کل توده خاک در محل پروژه می‌باشد) و نیز فعالیت‌های انسانی ناشی می‌شود [۴-۶]. معمولاً تغییرات





شکل ۱. انواع عدم قطعیت در مشخصه‌های خاک [۸]

Fig. 1. Categories of Uncertainty in Soil Properties [8]

منطقه‌ای که پارامترهای ورودی دقیقی ندارند، قابلیت کاربرد بالایی دارد [۱۳]. پروونزانو^۶ و همکاران مدل شبکه عصبی مصنوعی- سیستم استنتاج فازی را برای پیش‌بینی رفتار پی تحت بارگذاری محوری و همچنین تحت بارگذاری برون مرکزی را در برابر گسیختگی مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با آزمایش‌های بارگذاری، از همخوانی قابل قبولی برخوردار بود [۱۴]. میدانی و همکاران از مجموعه‌های فازی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای خاک استفاده کرده و به بررسی پایداری شیروانی خاکی پرداختند. ایشان مزیت اصلی این روش را محاسبات سریع نسبت به روش‌های تحلیلی پیچیده مانند روش‌های احتمالاتی و اجزای محدود برشمرده و گزارش نمودند که نتایج مدل فازی از نظر دقت، قابل مقایسه با روش‌های تحلیلی و عددی می‌باشد [۱۵]. کایادلن^۷ و همکاران با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی- سیستم استنتاج فازی به پیش‌بینی پتانسیل تومی خاک‌های متراکم پرداخته و نشان دادند که نتایج حاصله سازگاری مناسبی با آزمایش‌های آزمایشگاهی دارند [۱۶]. خادمی و همکاران از مجموعه‌های فازی برای طبقه‌بندی سنگ‌ها استفاده کرده و نشان دادند که مجموعه‌های فازی در فرایند تصمیم‌گیری کمک شایانی به مهندسان می‌کند و نظریه فازی دارای قابلیت اعتماد قابل قبولی برای سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ می‌باشد [۱۷]. بهارگوی^۸ و همکاران با استفاده از کد عددی

استفاده از نظریه‌ی احتمال، مبتنی بر منطق کلاسیک دو ارزشی، برای در نظرگیری عدم قطعیت‌ها، ابتدا در سال ۱۹۳۷ توسط مطالعات ماکس بلک و سپس توسط مجموعه‌های فازی، توسط لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ به چالش کشیده شد [۱۰]. لذا در بعضی شرایط روش‌های هوشمند مثل شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، الگوریتم ژنتیک (GA)، سیستم استنتاجی فازی (FIS) بر روش‌های تحلیلی ترجیح داده می‌شوند. بر این اساس روش فازی به عنوان جایگزین مناسب برای روش احتمالاتی مطرح شد [۵]. تئوری فازی بیانگر اطلاعات مبهم و ناگویا بوده و به لحاظ منطقی می‌توان آن را برای بیان عدم قطعیت‌ها به کار برد [۱۱].

کارهای تحقیقاتی گذشته حاکی از کارایی تئوری فازی در مدل کردن عدم قطعیت‌های مرتبط با مشخصات خاک می‌باشند. گریما^۴ و همکاران عملکرد دستگاه حفاری تونل را توسط روش شبکه‌های عصبی مصنوعی- سیستم استنتاج فازی مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را با نتایج به دست آمده از روش‌های آماری مقایسه کردند [۱۲]. رحمان و ونگ^۵، مدل شبکه عصبی مصنوعی- سیستم استنتاج فازی را برای پیش‌بینی روانگرایی به کار بردند و نتایج مدل را با نتایج مشاهدات میدانی مورد مقایسه قرار دادند. نتیجه این تحقیق بیانگر این موضوع بود که مدل مذکور برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی

- 1 Artificial Neural Networks
- 2 Genetic Algorithms
- 3 Fuzzy Inference Systems
- 4 Grima
- 5 M. Rahman, J. Wang

6 P. Provenzano
7 C. Kayadelen
8 P. Bhargavi

بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ زلزله پیشنهاد شده است. غالباً مرزها در آیین‌نامه‌ها به صورت مقادیر قطعی^۶ تعریف می‌شوند و تصمیم‌گیری در مرزها مبتنی بر منطق کلاسیک دو ارزشی به صورت صفر و یک می‌باشد. منطق فازی ابهاماتی که در تعریف مرزها ایجاد می‌شوند را برطرف می‌نماید. این ابهامات ناشی از عدم قطعیت‌های موجود در هر کدام از پارامترهای موثر در تعیین نوع زمین می‌باشد. با توجه به اینکه منطق فازی مبتنی بر زبان گفتاری است، لذا سیستم فازی طراحی شده این امکان را فراهم می‌نماید که با غلبه بر عدم قطعیت‌های مذکور در مرزهای طبقه‌بندی نوع زمین، با تعریف قوانین فازی و اختصاص درجه عضویت به هر کدام از پارامترها، در تعیین مرز نوع زمین نسبت به جدول‌های موجود در استاندارد ۲۸۰۰ به دقت بالاتری دست یافت. در طبقه‌بندی پیشنهادی نوع زمین، بر اساس پارامترهای موثر در تعیین نوع خاک، ابتدا توابع عضویت مثلثی مناسب تعریف و در نهایت سیستم استنتاج فازی این طبقه‌بندی بر اساس قواعد فازی تبیین می‌گردد.

۲- اثر انتخاب نوع زمین و تاثیر آن در برآورد نیروی برش پایه برای یک پرپود مشخص

همان گونه که در مقدمه ذکر گردید، شناخت ساختگاه امری ضروری در جهت کاهش خطرات لرزه‌ای است. ضریب بازتاب ساختمان بیانگر پاسخ ساختمان به حرکت زمین با توجه به نوع آن است. این ضریب بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ زلزله با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود [۱]:

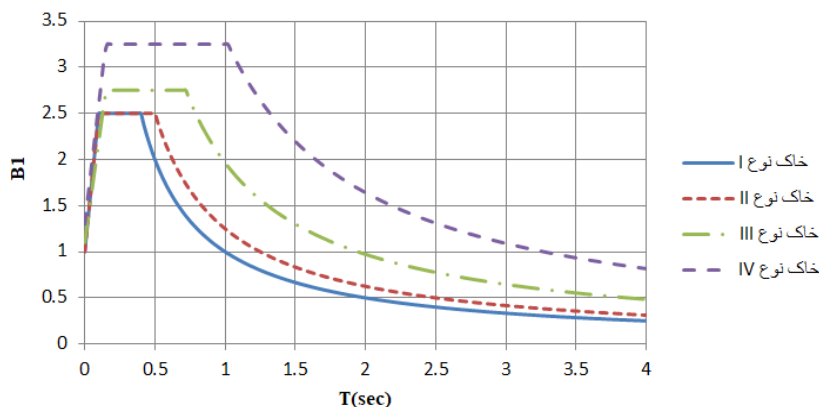
$$B = B_1 N \quad (1)$$

که در آن B_1 ضریب شکل و N ضریب اصلاح طیف می‌باشد. ضریب B_1 با در نظر گرفتن بزرگنمایی خاک در پرپودهای مختلف و میزان لرزه‌خیزی منطقه مشخص شده و مطابق شکل ۲ تعیین می‌گردد. با توجه به شکل مذکور، به عنوان مثال پاسخ سازه در سه پرپود پایین، متوسط و بالا مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور سه مقدار $0/6$ ، $1/2$ و 3 برای پرپود انتخاب گردید. مقادیر ضرایب شکل، اصلاح طیف و بازتاب برای انواع زمین مطابق جدول ۱ خواهد بود. به عنوان مثال ملاحظه می‌شود که در پرپود $1/2$ ثانیه، در منطقه با خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد، اختلاف ضریب بازتاب بین دو نوع زمین II و III، ۵۲ درصد است. با توجه به جدول

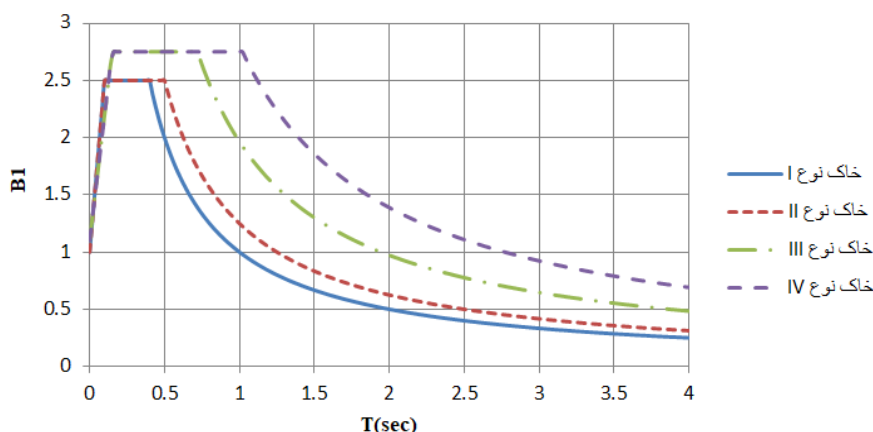
و بر اساس تعدادی داده آزمایشگاهی قوانین فازی مناسبی با بهینه‌سازی آن‌ها برای سیستم طبقه‌بندی فازی ارائه نمودند [۱۸]. مجتس^۱ و همکاران از مدل مبتنی بر تئوری فازی برای تعیین میزان تاثیر پارامترهای آلوده کننده خاک در مقاومت محصور نشده استفاده نمودند که حاکی از قابل قبول بودن نتایج در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بود [۱۹]. هاشمی جوکار و میراثی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی-سیستم استنتاج فازی مدلی برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع طراحی کردند که نتایج حاصل از مدل با نتایج حاصل از روابط تجربی سازگاری مناسبی دارد [۲۰]. هاشمی نژاد و همکاران برای رفع عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای موثر در ارزیابی پتانسیل فروریزی خاک‌های غیراشباع به روش شبکه عصبی مصنوعی-سیستم استنتاج فازی متوسل شدند. با توجه به این موضوع که نمی‌توان رابطه ریاضی دقیقی برای برآورد پتانسیل فروریزی خاک‌ها بیان نمود، مدل مورد مطالعه نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد که با اتکا به این نتایج، نیاز به انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی به حداقل می‌رسد [۲۱]. توکوز و ایلماز^۲، از طبقه‌بندی فازی برای به حداقل رساندن عدم قطعیت‌های ذاتی در طبقه‌بندی خاک‌های متورم شونده بر اساس روندنمای پیشنهادی وان در مرو^۳ استفاده کردند [۲۲]. سوچاتا^۴ و همکاران سیستم خبره فازی را برای طبقه‌بندی مهندسی خاک‌ها پیشنهاد دادند و نتایج تحقیق تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی دارد. ایشان با استفاده از سیستم خبره فازی و با استفاده از پارامترهای کمی که شامل ویژگی‌های شاخص خاک است، سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای خاک و بر اساس آیین‌نامه هندوستان (IS)^۵ ارائه دادند. نتایج نشان می‌دهند که سیستم فازی طراحی شده می‌تواند به طور موثری برای طبقه‌بندی مهندسی خاک مورد استفاده قرار بگیرد [۲۳]. به طور کلی جمع‌بندی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که می‌توان از سیستم استنتاج فازی به عنوان روشی قدرتمند و کارا در زمینه تصمیم‌گیری و کنترل مسائل مهندسی ژئوتکنیک استفاده نمود. در این مقاله ابتدا مقایسه‌ای میان طبقه‌بندی نوع زمین بر اساس سه آیین‌نامه اروپا، آمریکا و ایران انجام گرفته، سپس با توجه به اینکه در آیین‌نامه زلزله ایران، در مرز بین طبقه‌های مختلف خاک، نادیده گرفتن عدم قطعیت پارامترهای موثر در انتخاب نوع زمین می‌تواند منجر به اتخاذ تصمیم نامناسب برای تعیین نوع زمین شود، لذا سیستم استنتاج فازی برای تعیین نوع زمین

- 1 U. MAJTS
- 2 D. Toksoz, I. Yilmaz
- 3 Van Der Merwe
- 4 A. Sujatha
- 5 Indian Standard

خطر نسبی کم و متوسط



خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد



شکل ۲. ضریب شکل طیف طرح برای انواع زمین‌های مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ [۱]

Fig. 2. spectral shapes for various soil types in the Iranian standard of 2800

و یا میانگین مقاومت برشی زهکشی نشده تعیین می‌شود. بر اساس توصیه این آیین‌نامه وقتی در ارتباط با خصوصیات خاک، جزئیات کافی برای تعیین نوع زمین معلوم نباشد، گروه S_D برای خاک انتخاب می‌شود [۲].

۳-۲- طبقه‌بندی نوع زمین بر اساس آیین‌نامه Eurocode8-2012

نوع زمین در این آیین‌نامه بر اساس لایه‌های تشکیل دهنده زمین، سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر، عدد نفوذ استاندارد و مقاومت برشی زهکشی نشده به ۷ گروه تقسیم می‌شود. طبقه‌بندی ۵ گروه اول ابتدا باید بر اساس متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر انجام گیرد. اگر اطلاعات مستقیمی برای سرعت موج برشی در دست نباشد، از ۳ پارامتر مذکور برای تعیین نوع زمین استفاده می‌شود [۳].

مذکور ملاحظه می‌شود، در صورت انتخاب طبقه ناصحیح برای نوع زمین، در پریودهای متوسط و بالا، میزان تغییر پاسخ سازه و به تبع آن نیروی برشی پایه نسبت به پریودهای پایین بیشتر است و درصد اختلاف ضریب بازتاب می‌تواند تا ۶۶ درصد هم برسد. این موضوع ضرورت تاثیر انتخاب صحیح نوع زمین در محاسبه نیروی زلزله برای سازه را مشخص می‌نماید.

۳-۳- طبقه‌بندی نوع زمین بر اساس آیین‌نامه‌های معتبر

۳-۱- طبقه‌بندی نوع زمین بر اساس آیین‌نامه UBC-1997

بر اساس آیین‌نامه UBC-1997، ساختگاه به ۶ گروه طبقه‌بندی می‌شود که بر اساس معیارهای سرعت موج برشی، عدد نفوذ استاندارد و مقاومت برشی زهکشی نشده خاک، انجام گرفته است. اگر مقدار سرعت موج برشی خاک معلوم نباشد، گروه ساختگاه بر اساس متوسط عدد نفوذ استاندارد

جدول ۱. ضریب بازتاب سازه به ازای سه مقدار پریود مشخص برای انواع زمین بر اساس استاندارد ۲۸۰۰

Table 1. Reflection coefficient for three specified periods for different types of soil according to Iranian standard of 2800

پریود	میزان خطر لرزه‌خیزی	خطر نسبی کم و متوسط				خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
۰/۶	B_1	۱/۶۶۶۷	۲/۰۸	۲/۷۵	۳/۲۵	۱/۶۶۶۷	۲/۰۸	۲/۷۵	۲/۷۵
	N	۱/۰۲۲	۱/۰۱۱	۱/۰	۱/۰	۱/۰۳۹	۱/۰۲	۱/۰	۱/۰
	B	۱/۷۰۳	۲/۱۰	۲/۷۵	۳/۲۵	۱/۷۳۲	۲/۱۲	۲/۷۵	۲/۷۵
	درصد اختلاف ضریب بازتاب	%۲۳	%۳۱	%۱۸		%۲۲	%۳	%۰	
۱/۲	B_1	۰/۸۳۳	۱/۰۴	۱/۶۳	۲/۷۵	۰/۸۳۳	۱/۰۴	۱/۶۳	۲/۲۳
	N	۱/۰۸۸	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۰۳	۱/۱۵	۱/۱۴	۱/۱۰۶	۱/۰۴۷
	B	۰/۹۰۶	۱/۱۲	۱/۷۳	۲/۸۳	۰/۹۵۸	۱/۱۸۵	۱/۸	۲/۴۴
	درصد اختلاف ضریب بازتاب	%۲۴	%۵۴	%۶۴		%۲۴	%۵۲	%۳۶	
۳	B_1	۰/۳۳۳	۰/۴۲	۰/۶۵	۱/۰۹	۰/۳۳۳	۰/۴۲	۰/۶۵	۰/۹۲
	N	۱/۲۸۹	۱/۲۸۶	۱/۲۷۹	۱/۲۶۷	۱/۵۱	۱/۵	۱/۴۹	۱/۴۶۷
	B	۰/۴۲۹۲	۰/۵۴	۰/۸۳۱	۱/۳۸۱	۰/۵۰۳	۰/۶۳	۰/۹۶۸۵	۱/۳۴۹۶
	درصد اختلاف ضریب بازتاب	%۲۶	%۵۴	%۶۶		%۲۵	%۵۴	%۳۹	

سرعت موج برشی می‌توان با توجه به نوع دانه‌بندی خاک، از پارامترهای عدد نفوذ استاندارد یا مقاومت برشی زهکشی نشده استفاده کرد. همان گونه که در بخش مقدمه ذکر گردید، تعیین دقیق این سه پارامتر به علت عوامل مختلفی مانند خطای آزمایش، تغییرات فضایی توده خاک و کوچک بودن نمونه آزمایش نسبت به توده واقعی خاک امکان‌پذیر نبوده و منجر به بروز عدم قطعیت در تعیین پارامترهای مذکور گردیده و تصمیم‌گیری را با خطا همراه می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که مقادیر پارامترهای مذکور در فوق به صورت کران‌دار مشخص شده‌اند، لذا عدم قطعیت‌های مذکور در مرزهای محدوده‌ها نیز تاثیرگذار است. به عبارت دیگر مسئله مهم در طبقه‌بندی نوع زمین، شناسایی دقیق مرز بین دو گروه می‌باشد. همان گونه که در بخش مقدمه نیز اشاره گردید، تئوری فازی قابلیت مدل کردن عدم قطعیت‌ها را بدون نیاز به انجام محاسبات پیچیده دارد. در بخش بعدی مقایسه‌ای بین روش‌های مبتنی بر تئوری فازی و روش‌های قطعی در مسائل تصمیم‌گیری، انجام می‌گیرد.

۳-۳- طبقه‌بندی نوع زمین بر اساس آیین‌نامه ایران - استاندارد ۲۸۰۰
 بر اساس این استاندارد نوع زمین ساختگاه به ۴ گروه تقسیم‌بندی می‌شود. تعیین طبقه نوع زمین بر اساس مقدار سرعت موج برشی صورت می‌گیرد ولی در صورت عدم دسترسی به آن می‌توان در خاک‌های دانه‌ای با اندازه کوچک‌تر از شن، از تعداد ضربات نفوذ استاندارد و در خاک‌های چسبنده از مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده استفاده کرد. طبق توصیه استاندارد در صورت تردید در انطباق مشخصات محل ساختگاه با انواع گروه‌های موجود در استاندارد، باید نوع زمینی که ضریب بازتاب بزرگ‌تری به دست می‌دهد، انتخاب گردد [۱].

جدول ۲، مقایسه‌ای بین طبقه‌بندی نوع زمین در سه آیین‌نامه مذکور را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که در هر سه آیین‌نامه ابتدا ساختگاه‌ها بر اساس مصالح تشکیل دهنده لایه‌های زمین به صورت توصیفی و کیفی رده‌بندی می‌شوند و سپس بر اساس معیار کمی سرعت موج برشی طبقه‌بندی می‌گردند و در صورت نداشتن اطلاعات کافی در مورد

جدول ۲. طبقه‌بندی نوع زمین بر اساس آیین‌نامه‌های UBC-1997، Eurocode 8-2012، و استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۳-۱]

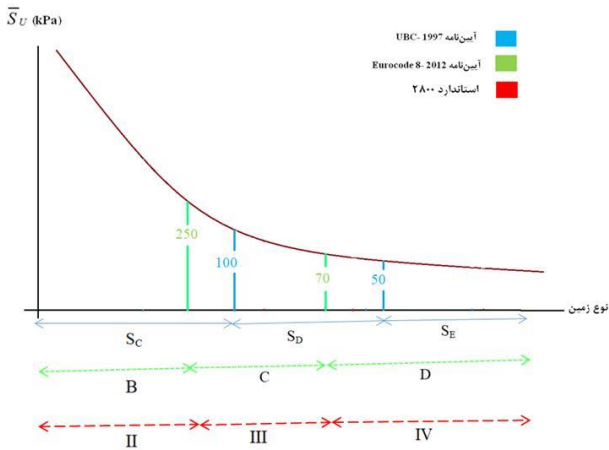
Table 2. Soil type classification based on UBC-1997, Eurocode 8-2012, and Iranian standard of 2800 [3-1]

پارامترها		توصیف لایه‌بندی زمین	نوع زمین
\bar{V}_S (m/s)	\bar{N}	\bar{S}_U (kPa)	
(ICB): >۷۵۰ (UBC): >۱۵۰۰ و ۱۵۰۰-۷۶۰ (EC): >۸۰۰	-	-	I (ICB), سنگ و شبه سنگ (S _A , S _B (UBC), A (EC))
(ICB): ۳۷۵-۷۵۰ (UBC): ۳۶۰-۷۶۰ (EC): ۳۶۰-۸۰۰	(ICB), (UBC), (EC): <۵۰	(ICB): <۲۵۰ (UBC): <۱۰۰ (EC): <۲۵۰	II (ICB), S _C (UBC), (S, B (EC))
(ICB): ۱۷۵-۳۷۵ (UBC): ۱۸۰-۳۶۰ (EC): ۱۸۰-۳۶۰	(ICB), (UBC), (EC): ۱۵-۵۰	(ICB): ۷۰-۲۵۰ (UBC): ۵۰-۱۰۰ (EC): ۷۰-۲۵۰	III (ICB), S _D (UBC), C (EC))
(ICB): <۱۷۵ (UBC): <۱۸۰ (EC): <۱۸۰	(ICB), (UBC), (EC): <۱۵	(ICB): >۷۰ (UBC): >۵۰ (EC): >۷۰	IV (ICB), S _E (UBC), D (EC))

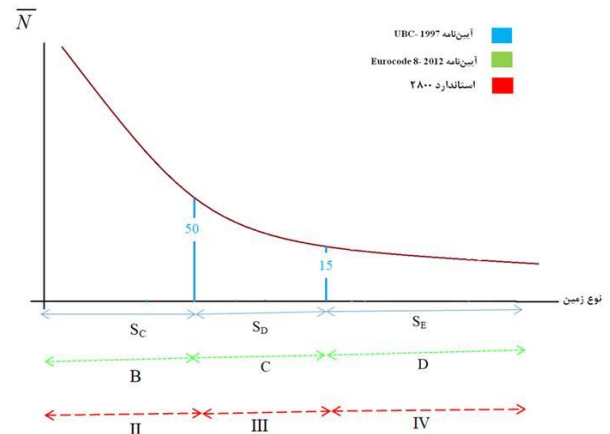
و Eurocode 8، نوع زمین در چهار گروه رده‌بندی می‌شود. با توجه به مطالب ارائه شده ملاحظه می‌گردد که یکی از پارامترهای موثر با دقت بالا در انتخاب نوع زمین، سرعت موج برشی است. اما مقادیر سرعت در مرزها برای تعیین نوع زمین نیاز به توجه بیشتری دارد. به عنوان مثال اگر سرعت موج برشی در یک پروفیل خاک برابر ۳۶۵ متر بر ثانیه باشد، این نوع خاک از نظر دو آیین‌نامه UBC-1997 و Eurocode 8 به ترتیب دارای نوع S_C و B با توصیف کیفی خاک بسیار متراکم و سنگ سست و از نظر استاندارد ۲۸۰۰ ایران دارای نوع III با توصیف کیفی خاک متراکم تا متوسط می‌باشد، لذا می‌توان این سوال را مطرح نمود که آیا مقدار سرعت موج برشی برابر ۳۶۰ یا ۳۷۵ متر بر ثانیه بر اساس سه آیین‌نامه مذکور، یک مرز قطعی بین دو نوع زمین محسوب می‌شود؟ پاسخ به این سوال منفی است، زیرا پارامتر سرعت موج برشی از طریق آزمایش اندازه‌گیری می‌شود و نتایج آزمایش قطعا با عدم قطعیت، هر چند ناچیز، همراه است. این مسئله در مورد پارامترهای مقاومت برشی زهکشی نشده و عدد نفوذ استاندارد نیز مطرح می‌باشد. همچنین بر اساس شکل مذکور مشاهده می‌شود که در منحنی مربوط به سرعت موج برشی اختلاف بین دو نوع زمین با توصیف کیفی یکسان در سه آیین‌نامه،

۳-۴- مقایسه طبقه‌بندی نوع زمین بر اساس آیین‌نامه‌های UBC-1997، Eurocode 8-2012 و استاندارد ۲۸۰۰ ایران

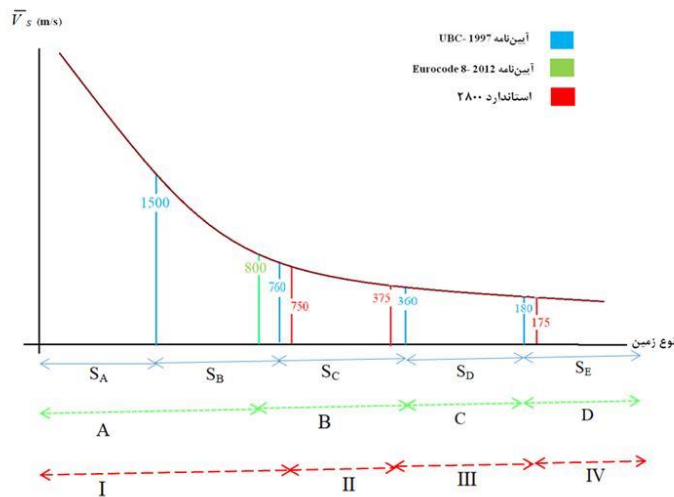
شکل ۳ مقایسه‌ای را بین پارامترهای موثر در انتخاب نوع زمین بر اساس سه آیین‌نامه مذکور نشان می‌دهد. مطابق این شکل محدوده‌های پیشنهادی برای عدد نفوذ استاندارد توسط سه آیین‌نامه یکسان بوده و بر اساس محدوده‌های پیشنهادی سه نوع زمین به استثنای لایه‌های متشکل از مصالح سنگی و شبه سنگی از هم متمایز می‌شوند. مطابق شکل مذکور محدوده‌های پیشنهادی برای پارامتر مقاومت برشی زهکشی نشده در دو آیین‌نامه Eurocode 8 و ۲۸۰۰، مشابه هم بوده و در آیین‌نامه UBC-1997 محدوده‌های توصیه شده دارای کرانه‌های پایین‌تری هستند. بر اساس این پارامتر نیز لایه‌های متشکل از مصالح خاکی در هر سه آیین‌نامه به سه نوع، طبقه‌بندی می‌شوند. اما با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که محدوده‌های پیشنهادی برای سرعت موج برشی در لایه‌های متشکل از مصالح خاکی و سنگی برای هر سه آیین‌نامه متفاوت می‌باشند. بر مبنای مقدار سرعت موج برشی، مطابق آیین‌نامه UBC-1997 نوع زمین در پنج دسته و بر اساس آیین‌نامه‌های ۲۸۰۰



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳. مقایسه محدوده‌های پیشنهادی برای پارامترهای الف) عدد نفوذ استاندارد، ب) مقاومت برشی زهکشی نشده و ج) سرعت موج برشی بر اساس سه آیین‌نامه UBC-1997، Eurocode 8-2012، استاندارد ۲۸۰۰ ایران

Fig. 3. Comparison of proposed ranges for parameters a) SPT blow count, b) undrained shear strength, and c) shear wave velocity based on UBC-1997, Eurocode 8-2012, and Iranian standard of 2800

محدوده ۳۶۰ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه و ۱۷۵ تا ۱۸۰ متر بر ثانیه نیز برای سرعت موج برشی شامل عدم قطعیت هستند. به طور مشابه برای پارامتر مقاومت برشی زهکشی نشده نیز محدوده‌های ۵۰ تا ۷۰ کیلوپاسکال و ۱۰۰ تا ۲۵۰ کیلوپاسکال دارای عدم قطعیت می‌باشند. به منظور تصمیم‌گیری دقیق‌تر در این بازه‌های دارای عدم قطعیت، می‌توان از روش‌های طبقه‌بندی نرم استفاده نمود که در بخش بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در سه مقدار مختلف ارائه شده است. مثلاً مرز بین دو طبقه S_C و S_B در آیین‌نامه UBC-1997، ۷۶۰ متر بر ثانیه، در آیین‌نامه Eurocode 8-2012، مرز بین دو نوع زمین A و B، ۸۰۰ متر بر ثانیه و در استاندارد ۲۸۰۰، مرز بین دو نوع زمین I و II، ۷۵۰ متر بر ثانیه می‌باشد. لذا با توجه به مطالب گفته شده می‌توان اظهار داشت که میزان سرعت موج برشی در محدوده ۷۵۰ تا ۸۰۰ متر بر ثانیه با عدم قطعیت همراه است. بر این اساس

۴- مقایسه بین روش‌های طبقه‌بندی سخت و نرم

طبقه‌بندی یک ابزار آماری بسیار مفید برای استخراج اطلاعات از داده‌ها است. از میان روش‌های مختلف طبقه‌بندی می‌توان به طبقه‌بندی سخت^۱ و طبقه‌بندی نرم یا فازی^۲ اشاره نمود. یک طبقه‌بندی نرم احتمالات شرطی یک گروه را به صراحت تخمین می‌زند و سپس پیش‌بینی آن را بر اساس بیشترین احتمال تخمین زده شده، انجام می‌دهد. در مقابل طبقه‌بندی سخت، بدون لحاظ الزام تخمین احتمال یک گروه، مرز طبقه‌بندی را مستقیماً تخمین می‌زند [۲۴]. به طور کلی ضعف چهارچوب ریاضیات کلاسیک این است که واژه‌هایی مثل کم، متوسط و زیاد در آن تعریف نشده و اگر بخواهیم قواعد نادقیق را به زبان ریاضیات کلاسیک تعریف کنیم، آنچه که به دست می‌آید ممکن است با آنچه که مدنظر است، متفاوت باشد. دلیل این مسئله عدم توانایی منطق کلاسیک برای بیان واقعیت‌های نادقیق است [۱۰]. چهارچوب فازی سعی می‌کند فاصله بین مدل‌سازی و واقعیت را کم کند. در این چهارچوب بستر مناسبی برای تعریف واژه‌های فازی مثل کم، متوسط و زیاد فراهم می‌شود که تطابق خوبی با واقعیت دارد. در مجموعه‌های کلاسیک یک شی یا به مجموعه تعلق دارد یا تعلق ندارد، زیرا مجموعه‌های کلاسیک مرزهای کاملاً مشخصی دارند، ولی در مجموعه‌های فازی مرزها شفاف نبوده و به این دلیل هر عضو مجموعه دارای یک درجه عضویت می‌باشد. به عبارت دیگر در یک مجموعه فازی میزان تعلق از طریق تابع عضویت که خود منحنی هموار و نرم بوده و با واقعیت تطابق بیشتری دارد، به اعضا نسبت داده می‌شود در حالی که در یک مجموعه کلاسیک تابع عضویت به صورت پله‌ای و صفر و یک است و نمی‌تواند مقادیر واقعی را بیان کند [۱۰]. انتخاب نوع طبقه‌بندی وابسته به طبیعت مجموعه داده‌ها است. بین دو نوع طبقه‌بندی فوق‌الذکر، طبقه‌بندی نرم اطلاعات بیشتری نسبت به طبقه‌بندی سخت ارائه می‌دهد و در نتیجه در شرایط خاص همراه با عدم قطعیت داده‌ها، مطلوب خواهد بود. با این حال اگر تخمین تابع احتمال یک گروه در برخی از مسائل پیچیده دشوار باشد، طبقه‌بندی سخت ممکن است با هدف قرار دادن فقط مرز طبقه‌بندی، طبقه‌بندی دقیق‌تری را ارائه دهد [۲۴]. مطالعات متعددی در زمینه مقایسه دقت این دو روش طبقه‌بندی انجام گرفته است [۲۵-۳۰]. نتایج نشان دهنده این است که روش‌های طبقه‌بندی نرم به اندازه روش‌های طبقه‌بندی سخت از دقت کافی برخوردار هستند.

۵- مدل استنتاج فازی پیشنهادی

جهت تعریف سیستم استنتاج فازی، باید داده‌هایی جامع جهت آموزش و طراحی سیستم در اختیار داشته باشیم. بدین منظور از پارامترهای مشخص شده جهت تعیین نوع زمین بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ استفاده می‌شود. مجموعه این پارامترها عبارتند از متوسط سرعت موج برشی در لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۳۰ متری از تراز پایه (\bar{V}_s)، متوسط عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده برای فشار موثر سربار و انرژی در لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۳۰ متری از تراز پایه (\bar{N}) و متوسط مقاومت برشی زهکشی نشده در خاک‌های چسبنده در لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۳۰ متری از تراز پایه (\bar{S}_U). به عبارت دیگر در سیستم استنتاج فازی طراحی شده، طبقه‌بندی نوع زمین با دانستن سه پارامتر مذکور مطابق رابطه (۲) تعیین خواهد شد. به عبارت دیگر:

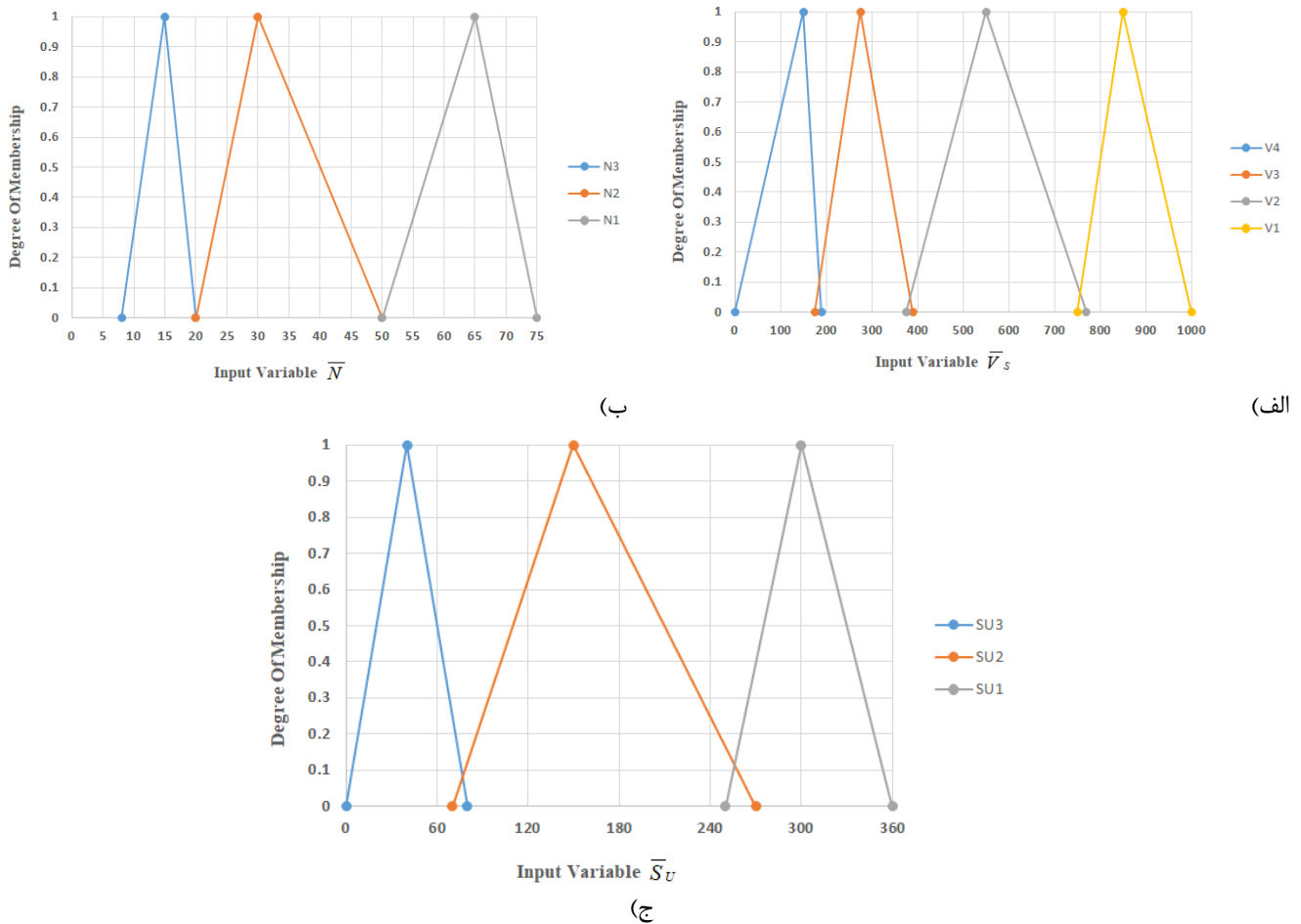
$$f(\bar{N}, \bar{S}_U, \bar{V}_s) = \text{نوع زمین} \quad (2)$$

لازم به ذکر است که فاصله ساختگاه از گسل فعال لرزه‌ای نیز یکی از پارامترهای شاخص جهت تعیین نوع زمین است ولی چون اطلاعات مستندی در دسترس نیست، لذا در این مدل پیشنهادی لحاظ نگردید. سیستم‌های استنتاج فازی شامل دو قسمت اصلی می‌شوند، قسمت اول توابع عضویت سیستم هستند که مهم‌ترین بخش طراحی یک سیستم استنتاج فازی را تشکیل می‌دهند و قسمت دوم قواعد فازی می‌باشند که از مجموعه‌ای از قواعد شرطی اگر-آنگاه تشکیل شده‌اند و وظیفه کنترل سیستم را بر عهده دارند. در این قسمت، استنتاج با استفاده از قواعد، برای رسیدن به یک خروجی منطقی انجام می‌گیرد [۳۱]. در ادامه در بخش‌های ۵-۱ و ۵-۲ هر کدام از این دو قسمت تشریح شده‌اند.

۵-۱- تابع عضویت پارامترهای ورودی

مهم‌ترین بخش طراحی یک سیستم فازی، طراحی توابع عضویت فازی برای هر کدام از پارامترهای ورودی و خروجی است. به این منظور برای هر کدام از پارامترهای ورودی و خروجی، تابع عضویت مناسب انتخاب می‌گردند. تنها شرطی که تابع عضویت باید ارضا کند این است که خروجی آن باید بین ۰ و ۱ باشد. به عبارت دیگر حداکثر درجه عضویت برابر ۱ می‌باشد. به منظور اعمال عدم قطعیت در سیستم استنتاج فازی پیشنهادی، از توابع

1 Crisp or Hard Classification
2 Fuzzy or Soft Classification



شکل ۴. توابع عضویت پارامترهای ورودی: الف) سرعت موج برشی، ب) عدد نفوذ استاندارد و ج) مقاومت برشی زهکشی نشده

Fig. 4. Membership functions of input parameters: a) shear wave velocity, b) SPT blow count, and c) undrained shear strength

انتخاب توابع از مقادیر پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ استفاده گردیده است. لذا بر اساس سه محدوده ارائه شده برای متوسط عدد نفوذ استاندارد، سه تابع عضویت مثلثی مطابق شکل ۴، ارائه شده است. در مورد تابع عضویت مربوط به سرعت موج برشی، مقادیر هم‌پوشانی با لحاظ توصیف کیفی خاک بر اساس جدول ۳ و جدول ۴ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین کرانه‌های توابع عضویت سرعت موج برشی، با روابط تجربی ارائه شده توسط اولوسای و حسن جبی^۱ و دیکمن^۲ مطابق روابط (۳) و (۴) نیز همخوانی دارند [۳۳ و ۳۴]. برای پارامتر مقاومت برشی زهکشی نشده نیز سه تابع عضویت مثلثی با توجه به سه محدوده ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که کرانه‌های بالا برای توابع عضویت هر سه پارامتر مذکور، به

عضویت پیوسته استفاده می‌شود. در این مرحله توابع عضویت پیوسته برای پارامترهای ورودی سرعت موج برشی، متوسط عدد نفوذ استاندارد و متوسط مقاومت برشی زهکشی نشده تعریف می‌شوند. معمولاً برای پارامترهایی با منشا طبیعی مانند خصوصیات خاک، تابع عضویت ناقوسی شکل در نظر گرفته می‌شود، ولی اگر تابع عضویت به شکل دیگری مانند دوزنقه‌ای یا مثلثی شکل انتخاب شود، تفاوت اساسی در نتایج حاصل نمی‌شود [۱۵ و ۱۰]. در این تحقیق، با توجه به اینکه تعداد داده‌های اندکی از آزمایش‌ها در دسترس بود، از توابع عضویت مثلثی شکل برای پارامترهای ورودی و خروجی مدل استفاده شد. مطابق استاندارد ۲۸۰۰، چهار محدوده برای سرعت موج برشی تعریف شده و برای هر کدام از این چهار محدوده، یک تابع عضویت مثلثی مطابق شکل ۴ تعریف شده است، به طوری که در هر مورد، سرعت موج برشی با مقادیر مجاور خود هم‌پوشانی داشته باشد. در

1 Hasancebi & Ulusay

2 Dikmen

جدول ۳. ارتباط بین سرعت موج برشی (\bar{V}_s) و عدد SPT برای خاک‌های غیرچسبنده [۳۲]

Table 3. Correlation between shear wave velocity (\bar{V}_s) and SPT blow count for non-cohesive soils [32]

شدیداً متراکم	متراکم	تقریباً متراکم	شل	الف - خاک‌های غیرچسبنده
>۵۰	۳۰-۵۰	۸-۳۰	<۸	عدد آزمایش نفوذ استاندارد
۸۰۰-۱۰۰۰	۶۰۰-۸۰۰	۳۰۰-۶۰۰	<۳۰۰	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)

جدول ۴. ارتباط بین سرعت موج برشی (\bar{V}_s) و عدد SPT برای خاک‌های چسبنده [۳۲]

Table 4. Correlation between shear wave velocity (\bar{V}_s) and SPT blow count for cohesive soils [32]

سخت	شدیداً سفت	سفت	تقریباً سفت تا سفت	ب - خاک‌های چسبنده
>۳۲	۱۶-۳۲	۸-۱۶	۸	عدد آزمایش نفوذ استاندارد
۵۰۰-۷۵۰	۳۰۰-۵۰۰	۲۰۰-۳۰۰	<۲۰۰	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)

۵-۲- تابع عضویت پارامتر خروجی نوع زمین

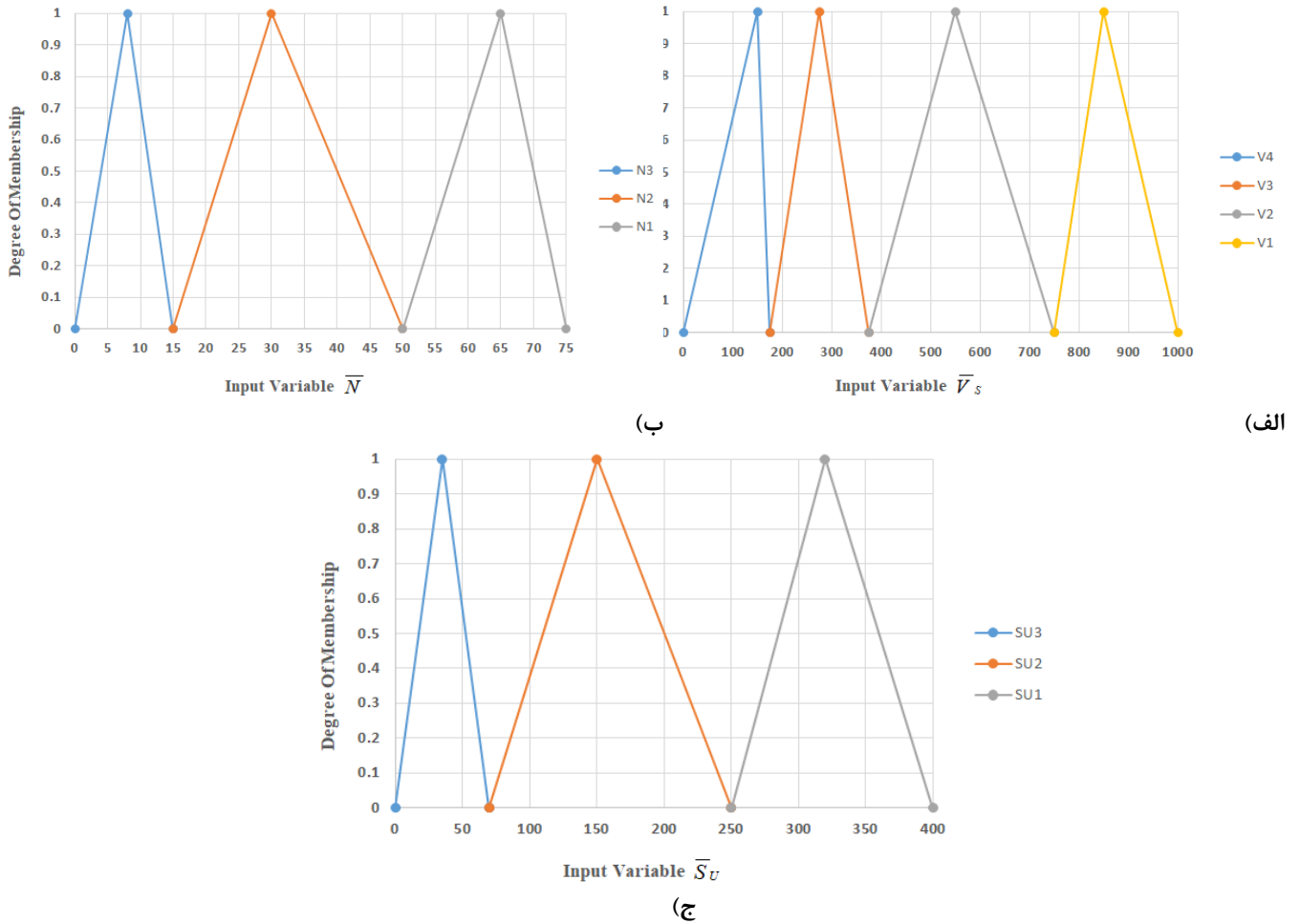
خروجی سیستم عبارت است از نوع زمین که بر اساس استاندارد ۲۸۰۰، به چهار نوع I، II، III و IV تقسیم‌بندی می‌شود. مطابق شکل ۶، برای تابع عضویت خروجی نیز از توابع عضویت مثلثی استفاده شده است. این توابع در طول از مبدا نظیر خود مقداری برابر یک داشته و با مقادیر مجاورشان نیز هم‌پوشانی دارند. به این مفهوم که در بعضی شرایط، خاک محل با نوع زمین اشاره شده در استاندارد ۲۸۰۰ تفاوت دارد و یا می‌تواند ترکیبی از خصوصیات دو گروه متفاوت باشد. مثلاً در تابع عضویت مربوط به زمین نوع (I)، در طول از مبدا ۱، مقدار عضویت برابر یک است. یعنی این نوع گروه، ۱۰۰ درصد خصوصیات خاک نوع (I) ذکر شده در استاندارد ۲۸۰۰ و ۵۰ درصد خصوصیات خاک نوع (II) را در خود جای داده است. همچنین زمین نوع (II)، ۱۰۰ درصد خصوصیات خاک نوع (II) و ۵۰ درصد خصوصیات خاک‌های نوع (I) و (III) را دارد.

لحاظ عددی از مقادیر توصیه شده آیین‌نامه بیشتر است که دلیل این موضوع اعمال عدم قطعیت در پارامترها می‌باشد. اگر این مسئله نادیده گرفته شود و کرانه‌ها عیناً بر اساس آیین‌نامه مطابق شکل ۵ در نظر گرفته می‌شوند، نوع زمین همانند آیین‌نامه به دست می‌آید. مقادیر عددی کرانه‌های توابع عضویت هر سه پارامتر سرعت موج برشی، عدد نفوذ استاندارد و مقاومت برشی زهکشی نشده در جدول ۵ ارائه شده است. در شکل‌های ۴ و ۵، مقادیر روی محور قائم درجه عضویت توابع عضویت را نشان می‌دهند.

$$V_s = 90N^{0.309} \quad (۳)$$

$$V_s = 58N^{0.39} \quad (۴)$$

در روابط (۳) و (۴)، V_s سرعت موج برشی و N عدد نفوذ استاندارد اصلاح نشده می‌باشند. همچنین دو رابطه فوق برای انواع خاک‌ها ارائه شده‌اند.



شکل ۵. توابع عضویت پارامترهای ورودی بر اساس محدوده‌های ارائه شده توسط استاندارد ۲۸۰۰ و بدون اعمال عدم قطعیت در مرزهای بین محدوده‌ها: الف) سرعت موج برشی، ب) عدد نفوذ استاندارد و ج) مقاومت برشی زهکشی نشده

Fig. 5. Membership functions of input parameters based on the limits provided by the Iranian standard of 2800 and without applying uncertainty to the boundaries between the limits: a) shear wave velocity, b) SPT blow count, and c) undrained shear strength

۵-۳- قواعد فازی

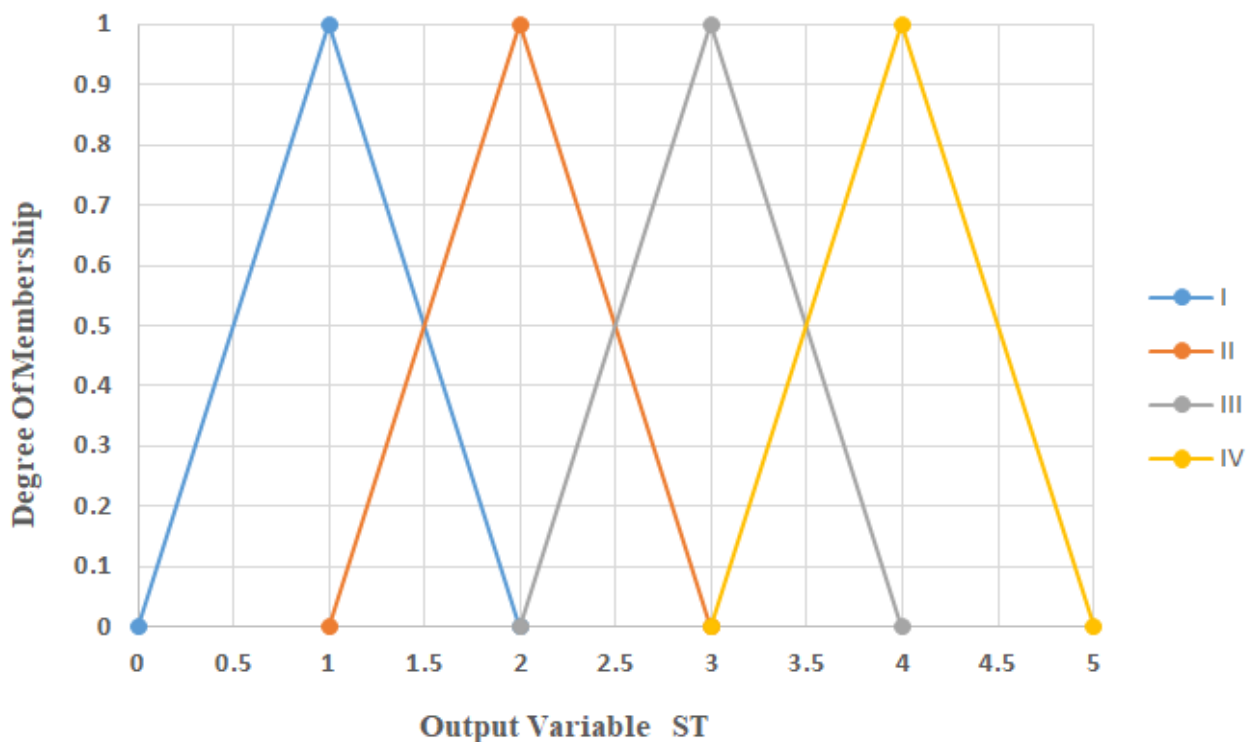
سیستم‌های استنتاج فازی را تشکیل می‌دهند و مهم‌ترین ابزار مدل‌سازی بر مبنای نظریه‌ی مجموعه‌های فازی هستند [۳۱]. استدلال فازی، رویه‌ای استنتاجی است که طی آن یک نتیجه‌ی خاص از مجموعه‌ای از قواعد If-then فازی و واقعیات شناخته شده، مشتق می‌شود. شکل ۷ رویه‌های مربوط به ورودی و خروجی مدل فازی را نشان می‌دهد. این رویه‌ها بیانگر تغییرات نوع زمین نسبت به پارامترهای موثر در مدل را می‌باشند که در نتیجه قوانین فازی حاصل شده است. با توجه به شکل مذکور ملاحظه می‌شود که در نواحی مرزی بین محدوده‌های ارائه شده توسط استاندارد ۲۸۰۰ برای ۳ پارامتر ورودی، بر اساس قوانین فازی نوشته شده، تغییرات بین مقادیر به صورت نرم می‌باشد. به عنوان مثال در رویه مربوط به تغییرات

قواعد فازی ابزاری بهینه برای مدل‌سازی کمی کلمات و جملات در یک زبان هستند. با تفسیر قواعد فازی به عنوان روابط فازی، انواع روش‌های استدلال فازی قابل بررسی هستند. با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌های مدل، ۴۰ قانون فازی برای مدل پیشنهادی نوشته شده است. قواعد فازی معمولاً بر اساس نظر افراد خبره و تجارب انسانی تعریف می‌شوند. با تفسیر قواعد فازی به عنوان روابط فازی، انواع روش‌های استدلال فازی قابل بررسی هستند. در روش‌های استدلال فازی، رویه‌های استنتاج بر اساس مفهوم قواعد ترکیبی استنتاج هستند که از آن‌ها برای اشتقاق نتیجه از قواعد مجموعه‌ی فازی و واقعیات شناخته شده، استفاده می‌شود. قواعد فازی و استدلال فازی اساس

جدول ۵. مختصات نقاط شروع، میانی و پایانی توابع عضویت تعریف شده برای سرعت موج برشی، عدد نفوذ استاندارد و مقاومت برشی زهکشی نشده

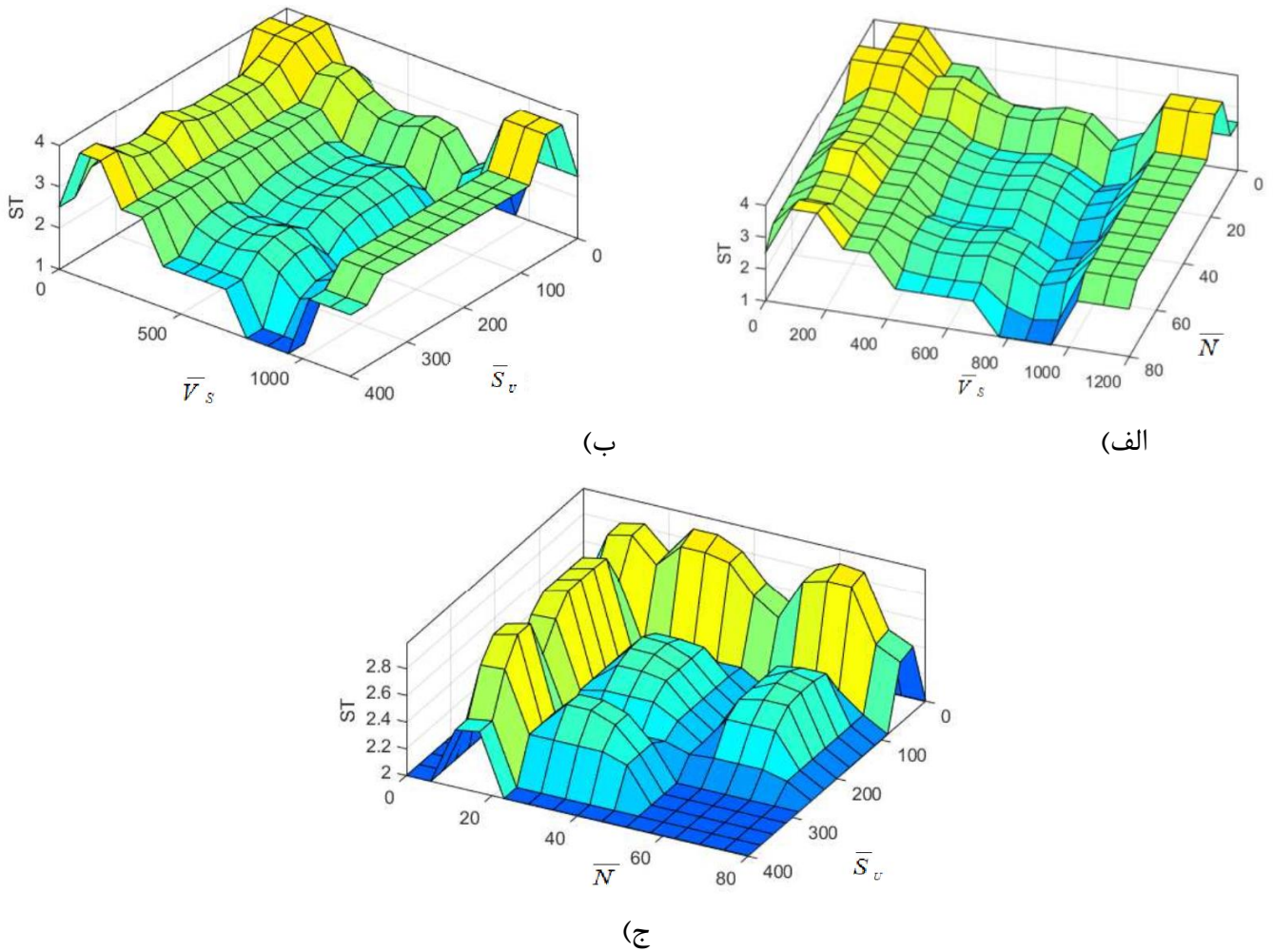
Table 5. Coordinates of start, middle, and endpoints of membership functions for shear wave velocity, SPT blow count, and undrained shear strength

V1	V2	V3	V4
۰-۷۵۰	۳۷۵-۰	۱۷۵-۰	۰-۰
۱-۸۵۰	۵۵۰-۱	۲۷۵-۱	۱۵۰-۱
۰-۱۰۰۰	۷۷۰-۰	۳۹۰-۰	۱۹۰-۰
SU1	SU2	SU3	
۰-۲۵۰	۷۰-۰	۰-۰	
۱-۳۰۰	۱۵۰-۱	۴۰-۱	
۰-۳۶۰	۲۷۰-۰	۸۰-۰	
N1	N2	N3	
۵۰-۰	۲۰-۰	۸-۰	
۶۵-۱	۳۰-۱	۱۵-۱	
۷۵-۰	۵۰-۰	۲۰-۰	



شکل ۶. توابع عضویت پارامتر خروجی

Fig. 6. Membership functions of the output parameter



شکل ۷. نمایش سه بعدی قواعد فازی الف) تاثیر سرعت موج برشی و عدد نفوذ استاندارد بر نوع زمین ب) تاثیر سرعت موج برشی و مقاومت برشی زهکشی نشده بر نوع زمین ج) تاثیر مقاومت برشی زهکشی نشده و عدد نفوذ استاندارد بر نوع زمین

Fig. 7. Fuzzy relational mapping surface in different view angles depicting a) influence of shear wave velocity and SPT blow count on soil type, b) influence of shear wave velocity and undrained shear strength on soil type, c) influence of undrained shear strength and SPT blow count on soil type

اگر فقط نتایج مربوط به پارامتر سرعت موج برشی در دست باشد، بر اساس محدوده‌های تعریف شده برای این پارامتر مطابق شکل ۴، نوع زمین مطابق استاندارد ۲۸۰۰ تعیین می‌شود با این تفاوت که مرزهای ارائه شده در شکل ۴ با مرزهای ارائه شده توسط استاندارد مطابق شکل ۵ به علت در نظرگیری عدم قطعیت‌ها متفاوت هستند. ولی اگر نتایج آزمایش‌های سایر پارامترهای موثر نیز در دست باشد، مبنای استنتاج به این صورت خواهد بود که، اگر نتایج مربوط به آزمایش‌های دو پارامتر (در صورت وجود سه پارامتر) منطبق بر محدوده‌های ارائه شده در شکل ۴ باشد، نوع زمین مطابق استاندارد تعیین می‌شود. مثلاً اگر داده‌های مربوط به پارامترهای سرعت موج برشی، مقاومت برشی زهکشی نشده و عدد نفوذ استاندارد منطبق بر محدوده‌های N_2 ، V_2

نوع زمین بر حسب دو پارامتر سرعت موج برشی و عدد نفوذ استاندارد، در مقدار سرعت ۳۷۵ متر بر ثانیه که مقدار مرزی در محدوده استاندارد می‌باشد، رویه با شیب ملایم تغییر می‌یابد، به عبارت دیگر به جای تابع عضویت دو مقداری، تابع عضویت چند مقداری برای پارامترهای ورودی تعریف شده که امکان اعمال عدم قطعیت‌ها را در مرزهای بین دو نوع مختلف زمین، میسر می‌سازد. قوانین مدل استنتاج فازی مطابق شکل ۸ می‌باشند. این شکل مجموعه تولید شده از "اگر-آنگاه" ها در ویرایشگر قواعدی که جهت طراحی سیستم استنتاج فازی مربوط به کار گرفته شده است را نشان می‌دهد. استنباط روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی بر مبنای قواعد تعیین شده در مرحله استنتاج می‌باشد. مبنای تولید قواعد فازی به این صورت است که

1	If(V_S is V2) and (S_u is Su1) then (ST is II)	21	If(N is N2) and (V_S is V4) then (ST is IV)
2	If(V_S is V2) and (S_u is Su2) then (ST is II)	22	If(N is N3) and (V_S is V4) then (ST is IV)
3	If(V_S is V2) and (S_u is Su3) then (ST is III)	23	If(N is N1) and (S_u is Su1) then (ST is II)
4	If(V_S is V3) and (S_u is Su1) then (ST is III)	24	If(N is N1) and (S_u is Su2) then (ST is III)
5	If(V_S is V3) and (S_u is Su2) then (ST is III)	25	If(N is N1) and (S_u is Su3) then (ST is IV)
6	If(V_S is V3) and (S_u is Su3) then (ST is IV)	26	If(N is N2) and (S_u is Su1) then (ST is III)
7	If(V_S is V4) and (S_u is Su1) then (ST is IV)	27	If(N is N2) and (S_u is Su2) then (ST is III)
8	If(V_S is V4) and (S_u is Su2) then (ST is IV)	28	If(N is N2) and (S_u is Su3) then (ST is IV)
9	If(V_S is V4) and (S_u is Su3) then (ST is IV)	29	If(N is N3) and (S_u is Su1) then (ST is IV)
10	If(V_S is V1) then (ST is I)	30	If(N is N3) and (S_u is Su2) then (ST is IV)
11	If(V_S is V2) then (ST is II)	31	If(N is N3) and (S_u is Su3) then (ST is IV)
12	If(V_S is V3) then (ST is III)	32	If (N is N1) and (V_S is V2) and (S_u is Su1) then (ST is II)
13	If(V_S is V4) then (ST is IV)	33	If (N is N2) and (V_S is V2) and (S_u is Su2) then (ST is II)
14	If(N is N1) and (V_S is V2) then (ST is II)	34	If (N is N3) and (V_S is V2) and (S_u is Su3) then (ST is III)
15	If(N is N2) and (V_S is V2) then (ST is II)	35	If (N is N1) and (V_S is V3) and (S_u is Su1) then (ST is III)
16	If(N is N3) and (V_S is V2) then (ST is III)	36	If (N is N2) and (V_S is V3) and (S_u is Su2) then (ST is III)
17	If(N is N1) and (V_S is V3) then (ST is III)	37	If (N is N3) and (V_S is V3) and (S_u is Su3) then (ST is IV)
18	If(N is N2) and (V_S is V3) then (ST is III)	38	If (N is N1) and (V_S is V4) and (S_u is Su1) then (ST is IV)
19	If(N is N3) and (V_S is V3) then (ST is IV)	39	If (N is N2) and (V_S is V4) and (S_u is Su2) then (ST is IV)
20	If(N is N1) and (V_S is V4) then (ST is IV)	40	If (N is N3) and (V_S is V4) and (S_u is Su3) then (ST is IV)

شکل ۸. قوانین تعریف شده در مدل استنتاج فازی

Fig. 8. Rules defined in the fuzzy inference system

گام اول) تعریف توابع عضویت پارامترهای موثر در انتخاب نوع زمین مطابق استاندارد ۲۸۰۰ (سرعت موج برشی، عدد نفوذ استاندارد و مقاومت برشی زهکشی نشده) بر اساس مرزهای ارائه شده در شکل ۴ (MATLAB>Edit>Membership Function>Input)

گام دوم) تعریف تابع عضویت خروجی نوع زمین مطابق شکل ۶ (MATLAB>Edit>Membership Function>Output)

گام سوم) ایجاد دستورات اگر-آنگاه مطابق شکل ۸ (MATLAB>Edit>Rules)

گام چهارم) معرفی پارامترهای موثر در انتخاب نوع زمین به عنوان ورودی سیستم استنتاجی فازی (مقدار حداقل یکی از پارامترهای موثر باید موجود باشد) (MATLAB>View>Rules>Input)

گام پنجم) مقدار پارامتر خروجی مربوط به تابع عضویت خروجی قرائت شده و با توجه به شکل ۶ تصمیم مناسب جهت انتخاب نوع زمین اتخاذ می‌گردد (MATLAB>View>Rules>Output)

و $Su2$ مطابق با شکل ۴ باشند (دستور شماره ۳۳)، نوع زمین منطبق بر گروه II خواهد بود ولی اگر نتایج آزمایش مربوط به پارامترها طوری باشند که مقدار هر پارامتر در محدوده ارائه شده برای دو گروه مختلف باشند، نوع زمین بر مبنای گروه ضعیف‌تر تعیین می‌شود. مثلاً اگر عدد نفوذ استاندارد مطابق شکل ۴ در محدوده N1 و مقاومت برشی زهکشی نشده در محدوده $Su2$ باشند (دستور شماره ۲۴)، نوع زمین بر اساس پارامتر مقاومت برشی زهکشی نشده تعیین شده و گروه III گزارش می‌شود. در خاتمه، این قواعد مورد ارزیابی قرار گرفته و خروجی فازی مشخص می‌شود. در نهایت خروجی به دست آمده، غیرفازی شده و نتیجه هدف که نوع زمین می‌باشد، بر مبنای عملکرد سیستم بیان می‌شود. در این قواعد، ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی بر مبنای محدوده‌های ارائه شده در شکل ۴ که برگرفته از استاندارد ۲۸۰۰ با اعمال هم‌پوشانی توابع عضویت مربوط به هر پارامتر در مرزها (جهت در نظرگیری عدم قطعیت) می‌باشد.

بر اساس مطالب ارائه شده، مراحل انجام طبقه‌بندی زمین بر اساس سیستم استنتاج فازی به طور خلاصه مطابق گام‌های زیر با استفاده از جعبه ابزار فازی نرم‌افزار MATLAB انجام می‌گیرد:

جدول ۶. پیش‌بینی مدل فازی از نوع زمین در چند مثال موردی در شهر تبریز

Table 6. Prediction of Fuzzy Inference System of soil type in some case studies in Tabriz

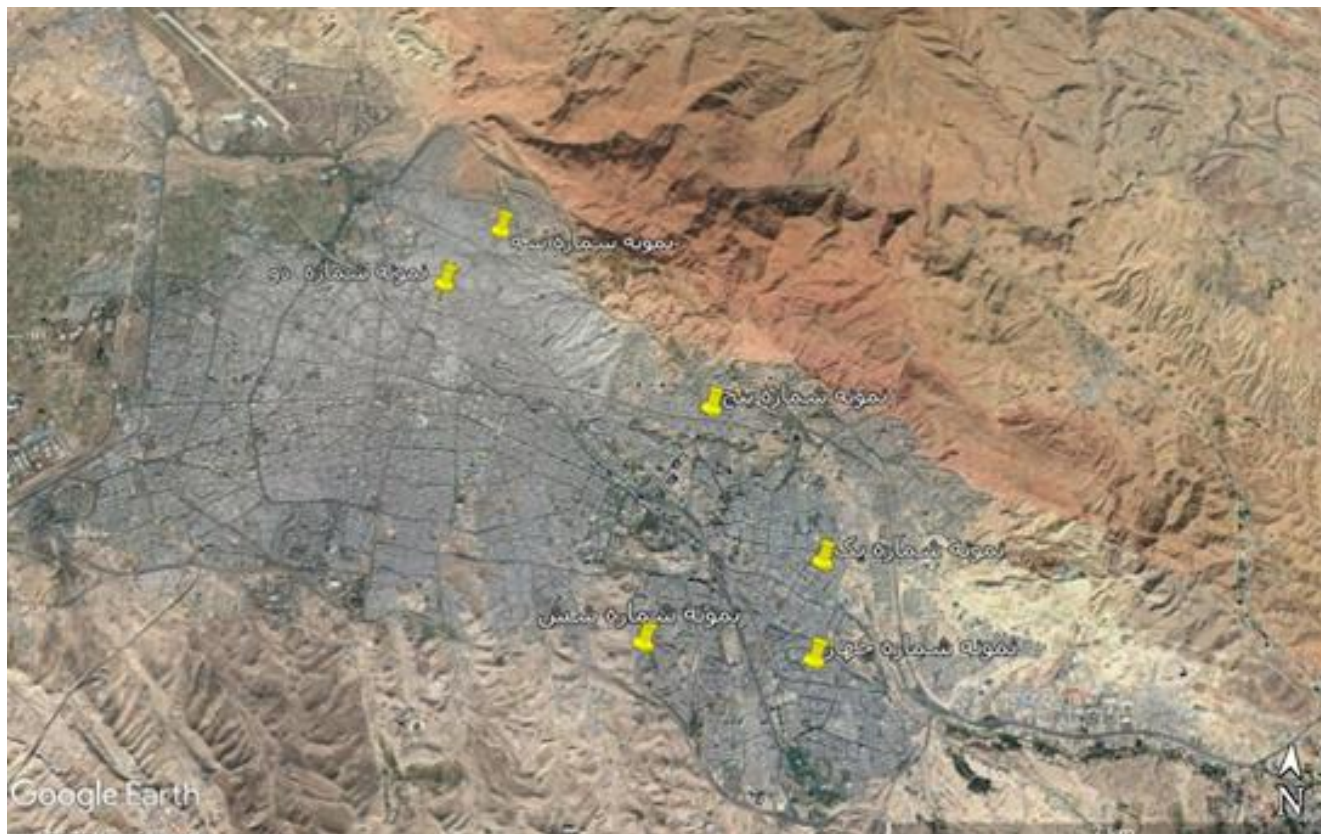
نوع خاک	\bar{V}_S (m/s)	N	\bar{S}_U (kPa)	طبقه‌بندی زمین بر اساس مدل فازی با توابع عضویت ورودی مطابق «شکل ۴»	طبقه‌بندی زمین بر اساس مدل فازی با توابع عضویت ورودی مطابق «شکل ۵»	طبقه‌بندی زمین بر اساس استاندارد ۲۸۰۰
۱- خاک چسبنده	۳۰۰	۴۵	۷۰	۳/۲۹	۳/۰۰	III
۲- خاک دانه‌ای	۳۸۰	۴۵	-	۲/۷۸	۲/۰۰	II
۳- خاک دانه‌ای	۴۰۰	۴۲	-	۲/۰۰	۲/۰۰	II
۴- خاک دانه‌ای	۶۵۰	-	-	۲/۰۰	۲/۰۰	II
۵- خاک چسبنده	-	-	۳۰۰	۲/۵۰	۲/۵۰	II
۶- خاک دانه‌ای	۸۰۰	-	-	۱/۰۰	۱/۰۰	I

۵-۴- مثال‌های موردی

در ادامه، صحت مدل در مثال‌های متفاوت بررسی می‌گردد. مثال‌های انتخابی، شامل خاک دانه‌ای فاقد چسبندگی مانند شن و ماسه بدون لای و رس، خاک چسبنده رسی و خاک دانه‌ای دارای مصالح چسبنده مانند شن و ماسه رس‌دار هستند که از مطالعات ژئوتکنیکی مربوط به ۶ پروژه مسکونی در مناطق مختلف شهر تبریز استخراج شده‌اند. شکل ۹ نقشه هوایی مربوط به پروژه‌های مورد نظر را نشان می‌دهد. مقادیر پارامترهای موثر در طبقه‌بندی نوع زمین، از مطالعات ژئوتکنیکی پروژه‌های مذکور به عنوان ورودی به مدل فازی طراحی شده، معرفی گردیدند. بر حسب اینکه مقدار کدام یک از پارامترهای سرعت موج برشی، عدد نفوذ استاندارد و مقاومت برشی زهکشی نشده برای خاک انتخابی در دسترس باشد، این مقادیر به عنوان ورودی مدل استنتاج فازی وارد محاسبات شده و نوع زمین تعیین می‌شود. نتایج حاصل از مدل فازی در جدول ۶ ثبت شده و با طبقه‌بندی پیشنهادی گزارشات ژئوتکنیکی مذکور که بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ارائه شده‌اند، مقایسه گردیدند. با توجه به منابع عدم قطعیت که در بخش‌های قبلی بررسی گردید، می‌توان گفت که مرزهای پارامترهای ورودی در چهار نوع طبقه‌بندی زمین می‌تواند محل بروز عدم قطعیت باشد. لذا مثال‌های مورد بررسی طوری انتخاب شده‌اند که مشخصات خاک، بر اساس سه پارامتر ورودی انتخابی، را هم در مرزها و هم در نواحی دور از مرزها شامل شوند. همچنین مثال‌های مذکور یک بار دیگر با توجه به توابع عضویت ورودی مطابق شکل ۴ مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج بررسی در جدول ۶ درج شده است.

در مثال‌های ۱، ۴ و ۶ نوع طبقه‌بندی مدل فازی با نوع طبقه‌بندی

استاندارد با هم مطابقت دارند. این سه مثال به دور از مرزهای بین انواع طبقه‌بندی قرار دارند. خاک مورد نظر در مثال ۱، حدود ۱۵ درصد مشخصات خاک نوع IV و ۷۰ درصد مشخصات خاک نوع III را دارد. خاک مورد مطالعه در مثال ۴ نیز ۱۰۰ درصد مشخصات خاک نوع II را دارد. در مورد مثال ۶، هم طبقه‌بندی توسط مدل فازی و هم طبقه‌بندی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰، هر دو زمین نوع I را نتیجه می‌دهند ولی چون پروژه مربوط به مطالعات ژئوتکنیکی شهری می‌باشد، لذا طبقه‌بندی زمین مورد مطالعه در گزارش ژئوتکنیک، نوع II ذکر گردیده است. در مثال‌های ۲، ۳ و ۵ که در نزدیکی مرز بین دو نوع مختلف زمین قرار دارند، استاندارد برای هر ۳ نوع خاک، طبقه‌بندی نوع II را پیشنهاد می‌دهد در حالی که مدل استنتاج فازی پیشنهادی، در مثال ۲ نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر پارامترهای ورودی مدل، پارامتر خروجی مدل که نوع زمین می‌باشد، در حدود ۳۰ درصد مشخصات زمین نوع II و ۷۰ درصد مشخصات زمین نوع III را داراست. دلیل این موضوع عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای ورودی می‌باشد که مدل فازی قادر به در نظر گرفتن آن‌ها بوده و جواب دقیق‌تری نسبت به استاندارد ارائه می‌دهد. در مثال ۳ نتیجه مدل فازی و آیین‌نامه یکسان می‌باشد. مدل استنتاج فازی برای مثال ۵ نشان می‌دهد که خاک مورد نظر ۵۰ درصد مشخصات زمین نوع II و ۵۰ درصد مشخصات زمین نوع III را داراست. دلیل این موضوع نیز عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای ورودی می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می‌شود که مدل استنتاج فازی بدون محاسبات پیچیده در نواحی مرزی بین دو نوع زمین، می‌تواند تصمیم منطقی و دقیقی نسبت به استاندارد اتخاذ نماید.



شکل ۹. موقعیت مکانی مثال‌های موردی در شهر تبریز

Fig. 9. Location of case examples in Tabriz

۶- نتیجه گیری

همانطوری که در این مقاله بحث شد در مسائل مهندسی، عدم قطعیت به شکل‌های مختلفی به صورت فازی (نامشخص، غیردقیق، تقریبی)، توأم با ابهام (نامعین، فاقد ساختار مشخص)، ناشی از نادیده گرفتن (نداشتن اطلاعات) و ناشی از متغیر بودن ذات و طبیعت (تصادفی، غیرقابل پیش‌بینی) بروز می‌نماید. مسئله اصلی در طبقه‌بندی نوع زمین، تعیین دقیق مرزها بین گروه‌های مختلف است. با توجه به این موضوع می‌توان گفت که حاشیه‌های محدوده تغییرات پارامترهای ورودی انتخابی برای خاک، می‌تواند بالاترین سطح از عدم قطعیت را شامل شوند. عدم توجه به این موضوع در تعیین نوع زمین، می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری دور از واقعیت شده و در نتیجه منجر به طراحی نادقیق لرزه‌ای شود. سیستم استنتاج فازی پیشنهادی جهت تصمیم‌گیری سریع و منطقی بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰، قادر به رفع این مشکل و تعیین نوع زمین می‌باشد. مهم‌ترین مزایای سیستم طبقه‌بندی فازی پیشنهادی، به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- با توجه به مثال‌های حل شده، ملاحظه می‌گردد که مدل پیشنهادی در مرزهای بین دو نوع طبقه متوالی خاک، پاسخ دقیق‌تری نسبت به استاندارد ارائه می‌دهد. لذا با توجه به شرایطی مانند دقت و صحت آزمایش‌ها، می‌توان تصمیم منطقی و دقیق‌تری نسبت به آیین‌نامه اتخاذ نمود. به طوری که این مورد مهم‌ترین ویژگی مدل استنتاج فازی معرفی شده می‌باشد.
- ۲- اگر مقادیر سه پارامتر موثر متوسط سرعت موج برشی، متوسط عدد نفوذ استاندارد و متوسط مقاومت برشی زهکشی شده در قسمت‌های داخلی محدوده‌های ارائه شده توسط استاندارد ایران (استاندارد ۲۸۰۰) قرار داشته باشند، در این صورت نتیجه حاصل از مدل استنتاج فازی پیشنهادی برای نوع زمین، مطابق تقسیم‌بندی استاندارد می‌باشد. ولی در قسمت‌های مرزی محدوده‌ها، مدل استنتاج فازی نتایج دقیق‌تری نسبت به استاندارد ارائه می‌دهد.
- ۳- در مدل استنتاج فازی پیشنهادی، می‌توان تعداد پارامترهای ورودی سیستم را افزایش داد. مثلاً می‌توان دانه‌بندی خاک و شاخص خمیری خاک

- applied to slope stability analysis, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(12) (1994) 2180-2207.
- [9] M. Oberguggenberger, W. Fellin, The fuzziness and sensitivity of failure probabilities, in: *Analyzing uncertainty in civil engineering*, Springer, 2005, pp. 33-49.
- [10] T.J. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*, Wiley Online Library, 2004.
- [11] T. Fetz, M. Oberguggenberger, J. Jager, D. Koll, G. Krenn, H. Lessmann, R.F. Stark, *Fuzzy models in geotechnical engineering and construction management*, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 14(2) (1999) 93-106.
- [12] M.A. Grima, P. Bruines, P. Verhoef, Modeling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods, *Tunnelling and underground space technology*, 15(3) (2000) 259-269.
- [13] M. Rahman, J. Wang, Fuzzy neural network models for liquefaction prediction, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 22(8) (2002) 685-694.
- [14] P. Provenzano, S. Ferlisi, A. Musso, Interpretation of a model footing response through an adaptive neural fuzzy inference system, *Computers and Geotechnics*, 31(3) (2004) 251-266.
- [15] M. Meydani, G. Habibaghahi, S. Katebi, An aggregated fuzzy reliability index for slope stability analysis, (2004).
- [16] C. Kayadelen, O. Günaydın, M. Fener, A. Demir, A. Özvan, Modeling of the angle of shearing resistance of soils using soft computing systems, *Expert Systems with Applications*, 36(9) (2009) 11814-11826.
- [17] J.K. Hamidi, K. Shahriar, B. Rezai, H. Bejari, Application of fuzzy set theory to rock engineering classification systems: an illustration of the rock mass excavability index, *Rock mechanics and rock engineering*, 43(3) (2010) 335-350.
- [18] P. Bhargavi, S. Jyothi, Soil classification by generating fuzzy rules, *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2(08) (2010) 2571-2576.
- [19] U. MAJTS, S. Dinesh, Fuzzy modeling for contaminated soil parameters, *Int J Fuzzy Syst Adv Appl*, 1 (2014) 66-71.
- را نیز به عنوان پارامتر ورودی مدل در نظر گرفت. این کار باعث افزایش دقت سیستم استنتاجی پیشنهادی و در نتیجه تصمیم‌گیری منطقی و دقیق‌تری خواهد شد، ولی چون در این مطالعه، مبنای طراحی سیستم فازی، استاندارد ۲۸۰۰ در نظر گرفته شده است، لذا فقط از سه پارامتر مذکور در استاندارد، یعنی متوسط سرعت موج برشی، متوسط عدد نفوذ استاندارد و متوسط مقاومت برشی زهکشی شده در لایه‌های مختلف خاک، استفاده شده است. اگر چنانچه تعداد داده‌های بیشتری در دسترس باشد، در تحقیقات بعدی می‌توان از تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی (ANFIS) برای طراحی مدل استنتاج فازی استفاده نمود.

منابع

- [1] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard no. 2800, Fourth edition.
- [2] U.B. Code, International building code, International Code Council, USA, (1997).
- [3] P. Bisch, E. Carvalho, H. Degee, P. Fajfar, M. Fardis, P. Franchin, M. Kreslin, A. Pecker, P. Pinto, A. Plumier, Eurocode 8: seismic design of buildings worked examples, Luxembourg: Publications Office of the European Union, (2012).
- [4] S. Qasim, I. Harahap, Geotechnical uncertainties and reliability theory applications, *Int. J. Eng. Res. Technol*, 1(6) (2012) 1-8.
- [5] W. Gong, L. Wang, S. Khoshnevisan, C.H. Juang, H. Huang, J. Zhang, Robust geotechnical design of earth slopes using fuzzy sets, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1) (2015) 04014084.
- [6] S. Miro, M. König, D. Hartmann, T. Schanz, A probabilistic analysis of subsoil parameters uncertainty impacts on tunnel-induced ground movements with a back-analysis study, *Computers and Geotechnics*, 68 (2015) 38-53.
- [7] Y. Honjo, Challenges in geotechnical reliability based design, *Geotechnical Safety and Risk*. ISGSR 2011, (2011) 11-28.
- [8] J.T. Christian, C.C. Ladd, G.B. Baecher, *Reliability*

- [27] J. Jara, R. Acevedo-Crespo, Crisp classifiers vs. fuzzy classifiers: A statistical study, in: International Conference on Adaptive and Natural Computing Algorithms, Springer, 2009, pp. 440-447.
- [28] E. Onieva, P. Lopez-Garcia, A. Masegosa, E. Osaba, A. Perallos, A comparative study on the performance of evolutionary fuzzy and crisp rule based classification methods in congestion prediction, Transportation Research Procedia, 14 (2016) 4458-4467.
- [29] M.R. Chenaghloou, A.A. Hamed, 03.30: Connection classification for a space structure jointing system, ce/papers, 1(2-3) (2017) 746-755.
- [30] E. Muchai, L. Odongo, J. Kahiri, Comparison of Crisp and Fuzzy Classification Trees Using Chi-Squared Impurity Measure on Simulated Data.
- [31] G. Klir, B. Yuan, Fuzzy sets and fuzzy logic, Prentice hall New Jersey, 1995.
- [32] K. Ishihara, A.M. Ansal, Dynamic behaviour of soils soil amplification and soil structure interaction. Final report, (1982).
- [33] N. Hasancebi, R. Ulusay, Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66(2) (2007) 203-213.
- [34] Ü. Dikmen, Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils, Journal of Geophysics and Engineering, 6(1) (2009) 61-72.
- 73.
- [20] M.H. Jokar, S. Mirasi, Using adaptive neuro-fuzzy inference system for modeling unsaturated soils shear strength, Soft Computing, 22(13) (2018) 4493-4510.
- [21] M.M. Hasheminejad, N. Sohankar, A. Hajiannia, Predicting the collapsibility potential of unsaturated soils using adaptive neural fuzzy inference system and particle swarm optimization, Scientia Iranica, 25(6) (2018) 2980-2996.
- [22] D. Toksoz, I. Yilmaz, A fuzzy prediction approach for swell potential of soils, Arabian Journal of Geosciences, 12(23) (2019) 1-10.
- [23] A. Sujatha, L. Govindaraju, N. Shivakumar, V. Devaraj, Fuzzy Expert System for Engineering Classification of Soils, in: Geotechnical Characterization and Modelling, Springer, 2020, pp. 85-101.
- [24] Y. Liu, H.H. Zhang, Y. Wu, Hard or soft classification? large-margin unified machines, Journal of the American Statistical Association, 106(493) (2011) 166-177.
- [25] J. Clive, M.A. Woodbury, I.C. Siegler, Fuzzy and crisp set-theoretic-based classification of health and disease, Journal of Medical Systems, 7(4) (1983) 317-332.
- [26] G. Metternicht, Categorical fuzziness: a comparison between crisp and fuzzy class boundary modelling for mapping salt-affected soils using Landsat TM data and a classification based on anion ratios, Ecological Modelling, 168(3) (2003) 371-389.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Meshkinghalam, M. Emami Tabrizi, M. R. Chenaghloou, Fuzzy classification of soils based on Iranian standard of 2800, Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 4035-4052.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20281.7389

