

## بررسی عوامل مؤثر بر عملیات تراکم دینامیکی در خاک‌های دانه‌ای مبتنی بر روش فازی

حمید کوهساری<sup>۱\*</sup>، امیر نجفی<sup>۲</sup>، حمید علی‌الهی<sup>۳</sup> و محمد آدم‌پیرا<sup>۴</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> تراکم دینامیکی، سیستم فازی، عمق بهبود نسبی، خاک‌های دانه‌ای.</p>	<p>روش تراکم دینامیکی با پرتاب وزنه یکی از روش‌های بهسازی خاک است که با توجه به مزیت‌های آن نسبت به سایر روش‌های بهسازی خاک امروزه اقبال قابل توجهی نسبت به آن دیده می‌شود. در این مقاله تلاش شده است تا با استفاده از سیستم فازی و روش استنتاج سوگنو، تأثیر پارامترهای دخیل در عملیات بهسازی به روش تراکم دینامیکی بر روی عمق بهبود نسبی بررسی گردد. متغیرهای ورودی سیستم شامل وزن کوبه، ارتفاع کوبش، شعاع کوبه، فواصل کوبش، تعداد ضربات و مقاومت نفوذ مخروط خاک بوده و از چهار عمق بهبود نسبی به عنوان خروجی سیستم برای خاک‌های دانه‌ای سست بهره گرفته شده است. داده‌های ورودی سیستم از مقالات معتبر علمی استخراج شده است. پس از ایجاد مدل فازی، جهت صحت‌گذاری تحلیل فازی، نتایج حاصل با نتایج عملیات تراکم دینامیکی معتبر جهان معتبرسازی گردیده و سپس به صورت مطالعه‌ی موردی، تراکم دینامیکی انجام گرفته در بندر شهید رجایی ایران با استفاده از مدل فازی تهیه شده، تحلیل شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که اثرات وزن کوبه بیشتر از ارتفاع کوبش بوده و کاهش فواصل کوبش در درجه‌ی سوم اهمیت قرار دارد. همچنین اندرکنش وزن کوبه و ارتفاع کوبش، بیشترین نقش را در روش‌های طراحی ایفا می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که شعاع بهینه‌ی کوبه برای اغلب الگوهای کوبش با انرژی‌های اعمالی متوسط به بالا برابر ۱/۵ تا ۲ متر، تعداد ضربات بهینه‌ی کوبش برابر ۲۵ ضربه و فاصله‌ی کوبش بهینه برابر ۶ الی ۷ متر می‌باشد و استفاده از این الگوی کوبش سبب به‌دست آمدن بیشترین عمق بهبود می‌گردد.</p>

### ۱- مقدمه

با پیشرفت و گسترش شهرها، کمبود زمین‌های مترکم و دارای خصوصیات مناسب جهت احداث سازه‌ها اهمیت بیشتری پیدا کرده و لزوم استفاده از روش‌های بهسازی زمین‌های نامناسب و سست آشکارتر گردیده است. روش تراکم دینامیکی با پرتاب وزنه یکی از روش‌های بهسازی خاک است که با توجه به مزیت‌های آن نسبت به سایر روش‌های بهسازی خاک امروزه اقبال قابل توجهی نسبت به آن دیده می‌شود. از مزایای روش تراکم دینامیکی می‌توان به ماهیت تجربی الگوهای طراحی تراکم دینامیکی،

پی‌سازی در زمین‌های نامناسب از جمله مسائلی است که در مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه خاص قرار گرفته است.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.koohsari@gmail.com

۱. کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ایران.
۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ایران.
۳. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ایران.
۴. دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

مناسب بودن برای گستره‌ی وسیعی از خاک‌ها، کم‌هزینه بودن نسبت به سایر روش‌های بهسازی و کارایی مناسب آن در بهسازی نواحی استحصال از دریا اشاره نمود. مفاهیم نظری و عملی تراکم دینامیکی برای اولین بار توسط منارد در سال ۱۹۵۷ معرفی گردید [۱]. تراکم دینامیکی، شامل پرتاب متوالی کوبه‌های سنگین با شعاع کوبه‌ی متفاوت از ارتفاع نسبتاً زیاد در یک الگوی ازپیش-طراحی شده می‌باشد. در این روش معمولاً از کوبه‌های فولادی یا بتنی به وزن ۵ تا ۴۵ تن استفاده می‌شود. به طور کلی عملیات کوبش در چند مرحله انجام شده که فازهای کوبش نامیده می‌شوند. در هر یک از فازهای کوبش سنگین، کوبه‌ها از ارتفاع معمول ۵ تا ۴۵ متر چندین مرتبه (معمولاً ۷ تا ۲۵ مرتبه) در شبکه‌ی کوبش تعیین شده پرتاب شده و بدین ترتیب لایه‌های سست تا عمق معمولاً کمتر از ۱۵ متر متراکم می‌شوند

در روش طراحی عملیات تراکم دینامیکی در عرف مهندسی، با استفاده از روابط تجربی موجود طرح اولیه‌ی الگوهای کوبش ارائه شده و در یک ناحیه‌ی آزمایشی کوبیده می‌شود و سپس کارایی الگوی کوبش ارائه شده با آزمون‌های صحرایی، قبل و بعد از کوبش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که الگوی پیشنهادی جوابگوی بهسازی خاک ناحیه نباشد، مجدداً الگوی جدید ارائه می‌شود؛ بنابراین به دلیل ماهیت سعی و خطا در طراحی الگوی کوبش، زمان و هزینه‌ی انجام پروژه می‌تواند افزایش یابد. از سوی دیگر گستردگی پارامترهای دخیل در عملیات تراکم دینامیکی، پرهزینه بودن آزمایشات صحرایی، جامع نبودن روش‌های تجربی و پیچیدگی‌های روش‌های عددی انجام شده، لزوم انجام مطالعات جامعی از عملیات تراکم دینامیکی را ضرورت می‌بخشد.

ارائه‌ی یک روش طراحی برای عملیات تراکم دینامیکی بدون داشتن اطلاعات و دید جامع نسبت به پارامترهای دخیل در مسأله، امکان‌پذیر نخواهد بود. به دیگر بیان، به علت تعدد عوامل محیطی و کارگاهی مؤثر در راندمان تراکم دینامیکی مخصوصاً در زمین‌های لایه‌ای، هر روش

طراحی که یک یا چند مورد از این عوامل را در نظر نگیرد، ناقص بوده و جوابگوی یک طراحی جامع نمی‌باشد. با توجه به اینکه روش‌های تجربی و عددی موجود، قادر به در نظر گرفتن تمام پارامترهای دخیل در تراکم دینامیکی نیستند و همچنین تأثیر پارامترهای مذکور به خوبی شناخته نشده است، از این‌رو استفاده از سیستم‌های فازی می‌تواند به عنوان روشی کارآمد به کار گرفته شود.

سیستم تخصصی فازی که تحت عنوان سیستم‌های استنتاج فازی (FIS) شناخته می‌شود، یک روش جدیدی در سیستم‌های تصمیم‌سازی در ارزیابی مسائل مهندسی ایجاد کرده است. سیستم استنتاج فازی توانایی تحلیل اطلاعات زبانی مبهم، غیر دقیق و ناکامل را داشته و کاربرد آن‌ها را در فرآیند تصمیم‌سازی بر اساس دانش تخصصی فراهم ساخته است. نظریه مجموعه‌های فازی، اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط پروفیسور لطفی عسکرزاده پایه‌گذاری شد [۲]. پس از چند سال و در اوایل دهه‌ی هفتاد، با مطرح شدن منطق فازی، اولین کاربردهای این تئوری در علوم مهندسی ارائه گردید. از آن زمان به بعد شاهد گسترش روزافزون جنبه‌های تئوری و عملی آن توسط دانشمندان علوم مختلف بوده‌ایم به طوری که امروزه تقریباً در تمام عرصه‌های صنعت و دانش، از این تئوری استفاده می‌گردد [۳-۶]. این روش موجب انتقال ساده‌تر مفاهیم بین انسان و کامپیوتر برای تصمیم‌گیری، و روش بهتری برای محاسبه‌ی اطلاعات غیر دقیق و نامطمئن می‌باشد. از کاربردهای روش‌های فازی در مهندسی ژئوتکنیک می‌توان به استفاده‌ی آن در پایداری شیب [۷]، مهندسی سنگ [۸ و ۹]، پی و تونل [۱۰ و ۱۱] اشاره کرد. در سال‌های اخیر تلاش‌هایی شده است تا از روش-های فازی و هوش مصنوعی جهت تحلیل و بهینه‌سازی پارامترهای تراکم دینامیکی استفاده گردد. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۲ [۱۲] کونگ وی و همکاران برنامه محاسباتی KFIDM را با استفاده از سیستم‌های فازی جهت بررسی عمق مؤثر تراکم دینامیکی تهیه نمودند. همچنین وانگ یان و همکاران [۱۳] از مدل فازی چند

دانش، مجموعه قواعد اگر-آنگاه (IF-THEN rules) به-دست آمده از دانش یا تجارب انسانی است [۱۶].

یک مجموعه‌ی فازی با یک تابع عضویت که مقادیر آن بین صفر و ۱ تغییر می‌کند، تعریف می‌شود. تابع عضویت دارای اعضایی با درجه‌ی عضویت متغیری براساس مقادیر تابع عضویت می‌باشد. به طور کلی دو نوع سیستم استنتاج فازی مطرح است: الف) سیستم استنتاج ممدانی [۱۵]. ب) سیستم استنتاج سوگنو [۱۷]. این دو سیستم استنتاج فازی خیلی مشابه هم هستند. عمده تفاوت آن‌ها در این است که تابع عضویت خروجی در روش سوگنو ثابت و یا خطی است و نیازی به غیرفازی‌ساز در آن وجود ندارد [۱۸]. در این تحقیق به‌علت اینکه متغیر خروجی به صورت عددی و ثابت است، از روش سوگنو استفاده شده است.

### ۳- ایجاد سیستم استنتاج فازی (FIS)

مراحل پیاده‌سازی سیستم فازی بدین صورت است که در گام اول، پارامترها و ساختار اولیه‌ی سیستم استنتاج فازی (FIS) انتخاب می‌شوند. سپس در طول فرآیند آموزش، متغیرهای ورودی و خروجی از تراکم دینامیکی انجام گرفته در جهان، به عنوان ورودی مطابق شکل (۱) به سیستم استنتاج فازی معرفی شده و نتایج حاصله با نتایج واقعی مورد مقایسه قرار گرفته و ساختار نهایی FIS و مقادیر بهینه‌ی متغیرها در حین آموزش تعیین می‌گردند. بنابراین، قوانین و سطوح پاسخ بررسی شده و بر اساس نتایج این مقایسه، پارامترهای سیستم استنتاج فازی تغییر پیدا نموده تا نتایج مطلوب حاصل گردد. تعیین پارامترهای سیستم فازی به صورت زیر می‌باشد:

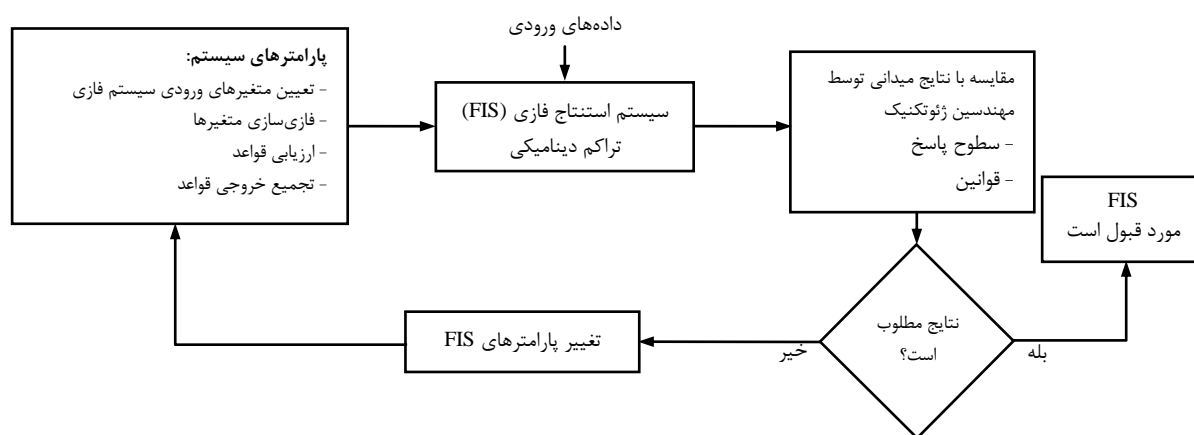
- تعیین متغیرهای ورودی سیستم فازی.
- فازی‌سازی متغیرها.
- ارزیابی قواعد.
- تجمیع خروجی قواعد.

هدفه جهت انتخاب بهینه‌ی پارامترهای تراکم دینامیکی استفاده کردند. نتایج این تحقیقات نشان داد که روش بهینه‌سازی فازی قابل قبول‌تر از سایر روش‌هاست. در سال ۲۰۰۶ قضاوی و همکاران [۱۴] از سیستم فازی با روش ممدانی [۱۵] جهت مدل‌سازی فازی تراکم دینامیکی استفاده کردند.

در این پژوهش با مطالعه‌ی مواردی از تراکم دینامیکی انجام شده در مناطق مختلف جهان، داده‌های آزمایشگاهی و تجربی آن‌ها استخراج شده و با استفاده از ابزار سیستم فازی، میزان و چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف اعم از وزن کوبه، ارتفاع کوبش، شعاع کوبه، تعداد ضربات کوبش، شبکه‌ی کوبش (فواصل کوبش) و مشخصات ژئوتکنیکی خاک به عنوان متغیرهای ورودی سیستم و عمق بهبود نسبی به عنوان متغیر خروجی در طراحی سیستم، شناسایی و بررسی گردیده است و نتایج حاصله با نتایج آزمایش‌های میدانی معتبر مقایسه و ارزیابی شده است. در ادامه، با استفاده از سیستم فازی تهیه شده، الگوی کوبش عملیات تراکم دینامیکی در بندر شهید رجایی واقع در جنوب ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### ۲- سیستم استنتاج فازی (FIS)

سیستم فازی همانند عملکرد مغز انسان که توانایی تفسیر اطلاعات حسی مبهم و ناقص را دارد، روشی سیستماتیک جهت قضاوت از چنین اطلاعات زبانی را فراهم می‌آورد. سیستم فازی فناوری جدیدی است که طراحی و مدل‌سازی یک سیستم نیازمند به ریاضیات پیچیده و پیشرفته را با استفاده از مقادیر زبانی و دانش فرد خبره ممکن می‌سازد. ساختار اساسی سیستم استنتاج فازی شامل دو زیرسیستم اصلی فازی‌ساز و پایگاه قواعد و یک زیرسیستم فرعی غیرفازی‌ساز می‌باشد. فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز وظیفه‌ی تبدیل اطلاعات بیرونی به مقادیر فازی و برعکس را بر عهده دارند. مرکز سیستم‌های فازی، پایگاه دانش بوده به طوری که مؤلفه‌ی کلیدی سیستم‌های مبتنی بر



شکل ۱- فرآیند آموزش سیستم استنتاج فازی

تجربی پروژه‌های مختلف تراکم دینامیکی صورت گرفته در نقاط مختلف جهان، رابطه‌ی تجربی بین شدت انرژی اشباع ( $I_s$ ) و  $E_B/P_L$  به صورت زیر ارائه نمودند:

$$I_s = \frac{100 (E_B / P_L)}{0.9 + 0.15 (E_B / P_L)} \quad (1)$$

که در آن:

$E_B$ : انرژی در هر ضربه ( $E_B = W.H$ )

$P_L$ : فشار پرسیومتر بوده که می‌توان به استفاده از رابطه-

ی بریاد و همکاران [۲۳] به  $q_c$  تبدیل نمود.

$I_s$ : شدت انرژی اشباع، که برابر شدت انرژی اعمالی است

که با استفاده از رابطه‌ی ماین و جونز [۲۴] برابر است با

$$(N.W.H / L^2)$$

بنابراین با استفاده از روابط فوق می‌توان به تعداد ضربات

در ماکزیمم عمق بهبود ( $N$ )، فواصل کوبش ( $L$ ) و

مشخصات ژئوتکنیکی خاک ( $q_{c0}$ ) دست یافت. برای در

نظر گرفتن اثر تعداد ضربات ( $N_i$ ) در روش لی [۲۱] نیاز

به تعداد ضربات در ماکزیمم عمق بهبود بوده، که بدین

ترتیب به دست خواهد آمد. با توجه به اینکه در این

پژوهش تلفیقی از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی در

پروژه‌های مختلف تراکم دینامیکی استفاده گردیده است،

داده‌های ورودی سیستم استنتاج فازی روش تحقیق

حاضر بسیار معتبر بوده و برای خاک‌های دانه‌ای با اعتبار

بالا قابل استفاده می‌باشند.

در ادامه، هرکدام از مراحل پیاده‌سازی سیستم فازی در عملیات تراکم دینامیکی توضیح داده می‌شود.

### ۳-۱- تعیین متغیرهای ورودی سیستم فازی

همان‌طور که ذکر گردید، در سیستم فازی به داده‌های

ورودی و خروجی از عملیات تراکم دینامیکی نیاز است. در

این مطالعه از شش متغیر ورودی شامل ارتفاع کوبش

( $H$ )، وزن کوبه ( $W$ )، شعاع کوبه ( $r$ )، تعداد ضربات ( $N_i$ )،

فواصل کوبش ( $L$ ) و مشخصات ژئوتکنیکی خاک ( $q_{c0}$ )

(مقاومت نفوذ مخروط) و چهار متغیر خروجی تحت

عناوین عمق بهبود نسبی ۸٪، ۱۵٪، ۳۰٪ و ۶۲٪ استفاده

شده است که در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته خواهد

شد. در این راستا، چهار متغیر ورودی ارتفاع کوبش ( $H$ )،

وزن کوبه ( $W$ )، شعاع کوبه ( $r$ )، تعداد ضربات ( $N_i$ ) و

همچنین هر چهار متغیر خروجی از نتایج آزمایشگاهی

مدل سانتریفیوژی اوشیما [۱۹ و ۲۰] و روش تخمینی

تراکم دینامیکی لی و جیو [۲۱] که روشی کارا و مؤثر

برای خاک‌های دانه‌ای است، استخراج شده است. برای

یافتن تعداد ضربات در ماکزیمم عمق بهبود ( $N$ )، فواصل

کوبش ( $L$ ) و مشخصات ژئوتکنیکی خاک ( $q_{c0}$ ) از فرمول-

های تجربی استفاده شده است. بدین صورت که لو و

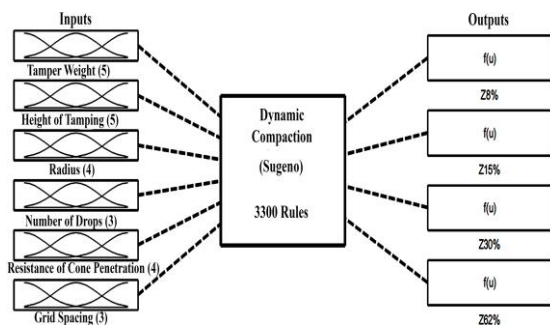
همکاران در سال ۱۹۹۰ [۲۲] با استفاده از داده‌های

## ۳-۲- فازی سازی متغیرها

گام نخست در سیستم‌های استنتاج فازی، دریافت ورودی‌ها و تعیین درجه‌ی عضویت آن‌ها به هر یک از مجموعه‌های فازی از طریق توابع عضویت می‌باشد. ورودی‌ها همواره مقادیر عددی محدود شده به مجموعه‌ی مادر متغیرهای ورودی هستند. خروجی این مرحله یک درجه‌ی فازی است که میزان عضویت ورودی را در مجموعه‌ی فازی تعیین می‌کند. این خروجی همواره یک عدد بین صفر و ۱ می‌باشد. همان‌طور که ذکر شد در جهت ایجاد توابع عضویت، اکتساب دانش به‌وسیله‌ی مهندسين ژئوتکنیک در مسأله‌ی تراکم دینامیکی و استخراج دانش در حوزه‌ی مربوطه از مسائل مهم سیستم فازی است. ساختار سیستم استنتاج فازی (FIS) مطابق شکل (۲) شامل شش پارامتر ورودی و چهار پارامتر خروجی می‌باشد.

برای متغیرهای ورودی و خروجی مطابق جدول (۱) بر اساس مقایسه با نتایج میدانی و اصلاح آن‌ها، محدوده و مقادیر میانی انتخاب گردیده و توابع عضویت برای متغیرهای ورودی در شکل (۳) ترسیم شده است. همان‌طور که در راهنمای (FHWA, 1995) [۲۵] به آن اشاره شده است در پروژه‌های مختلف از کوبه‌هایی به وزن ۵ تا ۴۵ تن استفاده شده است. بنابراین حد نهایی برای وزن کوبه، ۵ تا ۴۵ تن انتخاب گردید. عملاً کوبه‌ی ۵ تن برای اتوکشی استفاده می‌شود و محدوده‌ی مرسوم مورد استفاده در اغلب پروژه‌ها ۱۰ تا ۴۰ تن می‌باشد. برای توابع تعلق میانی، پس از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با نتایج واقعی و تصحیح آن‌ها، از کوبه‌هایی به وزن ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ تن استفاده شده است تا حساسیت سیستم به خوبی مشاهده شود. برای ارتفاع کوبش براساس نتایج پروژه‌های مختلف، محدوده‌ی ۵ تا ۴۵ متر و مقادیر میانی تصحیح شده‌ی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر انتخاب شده است. مطالعه‌ی عددی دوبعدی لی [۲۶] نشان می‌دهد که برای هر وزن کوبه، شعاع بهینه‌ای وجود دارد. بنابراین تابع

عضویت باید قادر به ارائه‌ی ویژگی سهمی‌وار شعاع کوبه باشد. در این راستا حد نهایی ۰/۵ تا ۳/۵ و مقادیر میانی تصحیح شده‌ی ۰/۸، ۱/۲، ۲ و ۳ استفاده شده است. لازم به ذکر است که در آزمایش سانتریفیوژ اوشیما [۱۹ و ۲۰] ماکزیمم تعداد ضربه ۴۰ بوده است. این در حالی است که در اغلب پروژه‌های عملی از ۱۰ تا ۳۰ ضربه و معمولاً برای اتوکشی حداقل از ۵ ضربه استفاده می‌شود. بنابراین در این مقاله، محدوده‌ی ۵ تا ۴۰ ضربه و تعداد ضربات میانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ مورد استفاده قرار گرفته است. برای پوشش دادن به تمامی محدوده‌های تراکم خاک‌های دانه‌ای، مقادیر مقاومت نفوذ مخروط ( $q_{c0}$ ) بین ۰/۲ تا ۲۰ و مقادیر میانی اصلاح شده‌ی ۰/۵، ۲، ۵ و ۱۰ مگاپاسکال برگزیده شده است تا روند تغییرات لگاریتمی  $q_{c0}$  قابل مشاهده باشد. فواصل ضربات کوبش در پروژه‌های مختلف ۲ تا ۱۲ متر بوده که فاصله‌ی ۴ تا ۱۰ متر بیشترین کاربرد را داشته‌اند. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، نقطه‌ی میانی ۷ متر نیز پس از اصلاح برای تابع تعلق میانی انتخاب گردیده است.



شکل ۲- ساختار سیستم استنتاج فازی (FIS) شامل ۶ ورودی، ۳۳۰۰ قاعده و ۴ خروجی

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود از ۲ تابع تعلق نیم دوزنقه‌ای برای ابتدا و انتهای توابع عضویت متغیرهای ورودی بهره گرفته شده و برای توابع تعلق میانی، توابع عضویت مثلثی مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که اشاره شد، برای متغیر خروجی، چهار عمق بهبود نسبی در نظر گرفته شده است. براساس مطالعه‌ی لی

است تا تقریباً کل ناحیه‌ی کوبش یافته را پوشش دهد. با توجه به اینکه در اغلب پروژه‌های مختلف و تجربیات به-دست آمده از ادبیات فنی موضوع، محدوده‌ی تأثیر بین صفر تا ۱۷ متر حاصل شده است لذا در این تحقیق نیز این محدوده انتخاب گردیده است. با انتخاب روش سوگنو برای استنتاج فازی، از اعداد ثابت که همان عمق بهبود برای چهار درجه‌ی بهبود نسبی می‌باشد، برای متغیر خروجی عمق بهبود نسبی استفاده شده است.

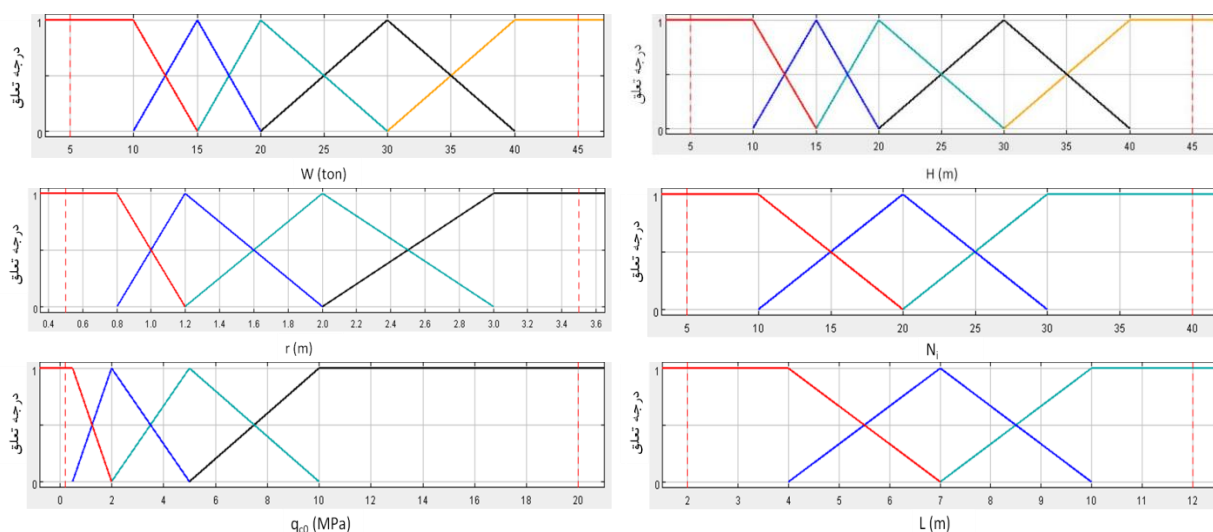
[۲۱]، منحنی‌های تراکم نسبی در برابر عمق برای حالت-های تراکم اولیه‌ی متفاوت، آرایش مشابهی دارند که نرمال کردن افزایش تراکم نسبی در هر نقطه بر ماکزیمم افزایش تراکم نسبی می‌تواند تفاوت بین حالت‌های مختلف تراکم نسبی اولیه را از بین ببرد که این پارامتر جدید درجه بهبود نسبی ( $I_r$ ) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_r = \frac{D_r - D_{r \min}}{D_{r \max} - D_{r \min}} \times 100\% \quad (2)$$

بنابراین، چهار درجه‌ی بهبود نسبی ۸٪، ۱۵٪، ۳۰٪ و ۶۲٪ به عنوان محدوده‌ی تأثیر کوبش در نظر گرفته شده

جدول ۱- متغیرها، واحدها و محدوده‌های مورد استفاده در سیستم فازی

متغیر	نشانه	واحد	محدوده و مقادیر میانی
ورودی	وزن کوبه	$W$	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵
	ارتفاع کوبش	$H$	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵
	شعاع کوبه	$r$	۰/۵، ۰/۸، ۱/۲، ۲، ۳، ۳/۵
	تعداد ضربات	$N_i$	۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰
	مقاومت نفوذ مخروط	$q_{c0}$	۰/۲، ۰/۵، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰
	فاصله‌ی کوبش	$L$	۲، ۴، ۷، ۱۰، ۱۲
خروجی	عمق بهبود نسبی ۸٪	$Z(I_r 8\%)$	$m$
	عمق بهبود نسبی ۱۵٪	$Z(I_r 15\%)$	$m$
	عمق بهبود نسبی ۳۰٪	$Z(I_r 30\%)$	$m$
	عمق بهبود نسبی ۶۲٪	$Z(I_r 62\%)$	$m$



شکل ۳- توابع عضویت سیستم فازی برای متغیرهای ورودی

## ۳-۳- ارزیابی قواعد

پس از فازی‌سازی ورودی‌ها، درجه‌ی درستی هر یک از قسمت‌ها تعیین شده است. در این قسمت باید پایگاه قواعد، اعمال عملگرهای فازی و اعمال روش دلالت تعریف شوند. قلب یک سیستم فازی، پایگاه دانش آن است که از قواعد اگر - آنگاه فازی تشکیل شده است. نقطه‌ی شروع برای ساخت یک سیستم فازی به‌دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر - آنگاه فازی با استفاده از دانش فرد متخصص در حوزه‌ی مورد بررسی است. در این مقاله با توجه به تعداد متغیرهای ورودی و تعداد توابع عضویت آن‌ها، به ۳۶۰۰ قاعده نیاز است. همان‌طور که اشاره شد این تعداد قواعد برای تمامی حالات ممکن از مقالات معتبر استخراج گردیده است. البته شایان ذکر است ۳۰۰ قاعده به دلیل عدم امکان اجرای آن در عملیات تراکم دینامیکی واقعی، حذف گردید. بنابراین ۳۳۰۰ قاعده در این تحقیق استفاده شده است. در مدل فازی سوگنو، یک قاعده دارای شکل کلی زیر است:

$$\text{If } X \text{ is } A \text{ AND } Y \text{ is } B \quad (3)$$

$$\text{THEN } Z \text{ is } f(x, y)$$

که  $A$  و  $B$  مجموعه‌های فازی و  $f(x, y)$  یک تابع در قسمت نتیجه‌ی قاعده می‌باشد. معمولاً  $f(x, y)$  یک چند جمله‌ای با متغیرهای  $x$  و  $y$  است. در تحقیق حاضر تابع  $f(x, y)$  یک تابع ثابت از جنس عمق می‌باشد. نمونه‌ای از قاعده‌ی فازی استفاده شده در سیستم فازی به صورت زیر است:

$$\text{If } H \text{ is } 10 \text{ AND } W \text{ is } 10 \text{ AND } r \text{ is } 0.8 \quad (4)$$

$$\text{AND } N_i \text{ is } 10 \text{ AND } q_{c_0} \text{ is } 0.5 \text{ AND } L \text{ is } 4$$

THEN

$$Z (I_r 8\%) \text{ is } 3.96 \text{ AND } Z (I_r 15\%) \text{ is } 3.06$$

$$\text{AND } Z (I_r 30\%) \text{ is } 2.07 \text{ AND } Z (I_r 62\%) \text{ is } 1.52$$

در مرحله‌ی بعد در صورتی که قسمت فازی دارای چند بخش باشد، از عملگرهای فازی برای ترکیب درجه‌ی درستی بخش‌ها و تولید یک عدد به عنوان درجه‌ی درستی قسمت فرض شرط استفاده می‌شود. در این مقاله

از ضرب (Product) برای عملگر AND و از ماکزیمم برای عملگر OR بهره گرفته شده است.

## ۳-۴- تجمیع خروجی قواعد

در روش سوگنو به‌علت اینکه  $f(x, y)$  برابر یک عدد ثابت است، از سیستم تحت عنوان مدل فازی سوگنوی درجه‌ی صفر یاد می‌شود. می‌توان به سوگنوی درجه‌ی صفر به عنوان نوع خاصی از سیستم استنتاج فازی ممدانی - که نتیجه‌ی هر قاعده یک عدد است - نگریست. خروجی نهایی در این روش با استفاده از میانگین وزن‌دار شده محاسبه می‌شود. به این ترتیب این روش فاقد فرآیند زمان‌بر غیرفازی سازی در مدل ممدانی است. در عمل، گاهی عملگر میانگین وزن‌دار شده با عملگر جمع وزن‌دار شده جایگزین می‌گردد. در این پژوهش از میانگین وزن‌دار شده استفاده گردیده است و وزن هر قاعده ۱ انتخاب شده است. بنابراین فرمول زیر قابل استفاده خواهد بود [۲۷]:

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N W_i Z_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (5)$$

که در این رابطه  $N$  تعداد قواعد،  $Z$  خروجی هر قاعده و  $W$  وزن هر قاعده که در اینجا برابر ۱ است، می‌باشد.

## ۴- اعتبار سنجی سیستم فازی تهیه‌شده

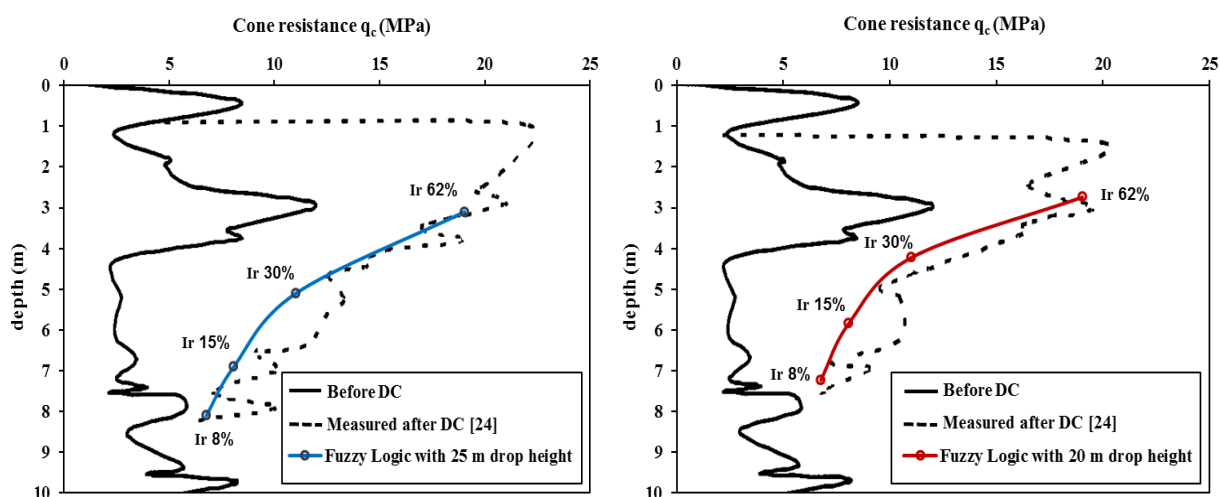
در این بخش جهت صحت‌گذاری نتایج حاصل از مدل‌سازی فازی، تراکم دینامیکی صورت گرفته در سایت کامپونگ پاکار (مالزی) ارائه شده توسط لی و همکاران [۲۸] مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. این سایت شامل ۱۰ تا ۱۲ متر خاک رس سیلتی بوده که توسط ۱۴ متر ماسه‌ی شل از بالا و پایین احاطه شده است و سنگ بستر آهکی در زیر لایه‌ی ماسه‌ای قرار دارد. سطح آب زیرزمینی در منطقه، در عمق ۳ متری از سطح زمین قرار دارد. در این محل سه پاس تراکم دینامیکی با استفاده از وزنه‌ی ۱۵ تنی و کوبه‌ی مربعی ۱/۸×۱/۸ متری با الگوی کوبش ۶×۶ متر انجام گرفته است. در پاس اول کوبه‌ی ۱۵ تنی، ۱۲

در طراحی الگوی کوبش تراکم دینامیکی، یافتن حداکثر عمق تأثیر اهمیت بسزایی دارد در این تحقیق، حداکثر عمق تأثیر به صورت  $Z(I_r, 8\%)$  (عمق بهبود نسبی ۸٪) تعریف می‌شود. بدین شکل که، عمق تأثیر برابر حداکثر عمقی است که پس از کوبش، تراکم خاک به میزان ۸٪ افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود منحنی خط توپر، نتایج مقاومت نفوذ مخروط حاصل از آزمایش CPT قبل از کوبش بوده و نتایج اندازه‌گیری شده پس از کوبش نیز با خط چین نشان داده شده است. مطابق شکل (۴)، عمق بهبود نسبی ۸٪ پس از فاز اول برابر ۷/۲۳ متر و پس از فاز دوم برابر ۸/۱ است که کاملاً منطبق بر نتایج حاصل از آزمایش CPT پس از کوبش (خط چین) می‌باشد. بنابراین تطابق مناسبی بین نتایج تجربی با مدل‌سازی فازی این تحقیق وجود دارد که حاکی از توانایی بالای این مدل در پیش‌بینی عمق بهبود نسبی می‌باشد.

بار از ارتفاع ۲۰ متری و در پاس دوم، ۶ بار از ارتفاع ۲۵ متری کوبیده شده است. پاس سوم جهت اتوکشی با انرژی کم، در الگوی ۴×۴ متر از ارتفاع ۶ متری انجام گرفته است. در این مقایسه فرض شده است که مرحله‌ی اتوکشی تأثیری بر عمق تأثیر ندارد. آزمایش نفوذ مخروط، قبل و بعد از هر مرحله‌ی کوبش جهت ارزیابی نتایج استفاده شده به‌طوری که مقاومت نفوذ مخروط اولیه‌ی خاک برای ۱۰ متر خاک برابر ۵/۵ مگاپاسکال بوده است. طبق نظر یانگ [۲۹] اضافه فشار آب حفره‌ای اضافی تولید شده در عملیات تراکم دینامیکی در خاک‌های ماسه‌ای با نفوذپذیری بالا، سریع زایل می‌شود. بنابراین از فشار آب حفره‌ای اضافی در سیستم فازی صرف‌نظر شده است. خلاصه الگوی کوبش انجام گرفته در سایت کامپونگ پاکار (مالزی) در جدول ۲ و نتایج مقایسه‌ای آن در شکل (۴) آورده شده است.

جدول ۲- الگوی کوبش تراکم دینامیکی مورد استفاده در سایت کامپونگ پاکار (مالزی)

الگوی کوبش	وزن کوبه (تن)	ارتفاع کوبش (متر)	تعداد ضربات	فواصل کوبش (متر)	شعاع کوبه (متر)	مقاومت نفوذ مخروط (مگاپاسکال)
الف) پس از پاس اول	۱۵	۲۰	۱۲	۶	۱/۰۲	۵/۵
ب) پس از پاس دوم	۱۵	۲۵	۱۸	۶	۱/۰۲	۵/۵



ب) پس از پاس دوم

الف) پس از پاس اول

شکل ۴- مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی فازی با نتایج میدانی سایت کامپونگ پاکار [۲۸] برای مقاومت نفوذ مخروط قبل و پس از تراکم در پاس‌های اول و دوم کوبش



## ۵- آنالیز نتایج

از جمله نتایج فازی‌سازی تراکم دینامیکی، کاربردی نمودن دانش موجود در قالب یک نگاشت غیرخطی است به طوری که سیستم قادر است با توجه به مقدار متغیرهای ورودی، خروجی را محاسبه نماید. به عنوان مثال در شکل (۵) برای حالتی که  $W=25\text{ton}$ ،  $H=10\text{m}$ ،  $r=1.2\text{m}$ ،  $N_f=20$ ،  $L=6\text{m}$  و  $q_{e0}=5\text{MPa}$  باشند، عمق‌های بهینه نسبی ۸٪، ۱۵٪، ۳۰٪ و ۶۲٪ به ترتیب برابر ۸/۸، ۷/۳۵، ۵/۴۵ و ۳/۸ متر به دست خواهد آمد. از دیگر نتایج سیستم فازی ایجاد شده، بررسی مقدار تأثیر هر یک از پارامترهاست. باید توجه داشت عمق بهبود نسبی ۸٪ به عنوان متغیر خروجی در نمودارهای پیش‌رو در نظر گرفته شده است. بر اساس روابط تجربی در طراحی عملیات بهسازی با روش تراکم دینامیکی، مقدار انرژی اعمالی در هر پرتاب (حاصل ضرب وزن در ارتفاع سقوط کوبه)، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در رسیدن به عمق بهبود مورد نظر است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود اثرات وزن کوبه بیشتر از ارتفاع کوبش می‌باشد. تأثیر افزایش وزن کوبه بر افزایش میزان بهبود خاک را می‌توان با تشریح تأثیر افزایش ممنوم بر افزایش کارایی انرژی انتقال یافته به زمین بیان نمود. بدین صورت که ممنوم با وزن کوبه و جذر ارتفاع کوبش رابطه‌ی مستقیم دارد بنابراین برای یک انرژی مشخص در هر ضربه، استفاده از وزنه‌ی سنگین‌تر موجب افزایش بیشتر ممنوم و در نتیجه افزایش عمق بهبود خاک می‌شود.

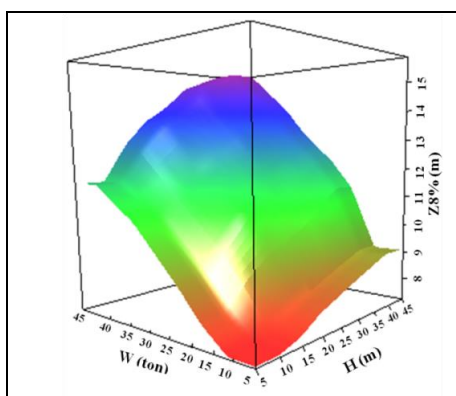
از نمودارهای سه بعدی شکل (۷) پیداست که ارتفاع کوبش و وزن کوبه همچنان پارامترهای مؤثرتری نسبت به افزایش تعداد ضربات و کاهش فواصل کوبش می‌باشند. به نظر می‌رسد برای هر انرژی کوبشی، تعداد ضربات بهینه‌ای وجود دارد که تعداد ضربات بیشتر از آن تأثیر چندان زیادی بر عمق بهینه‌ی کوبش ندارد. به ویژه با افزایش ارتفاع کوبش، این اثر بیشتر شده که دلیل آن را می‌توان این‌گونه بیان نمود که با افزایش ارتفاع کوبش، تراکم خاک

بیشتر شده و افزایش تعداد ضربات از حدی به بعد، تراکم خاک را تغییر نخواهد داد. مطالعات بر روی تعداد ضربات کوبش نشان از این دارد که تعداد ضربات کوبش بهینه برای اغلب الگوهای کوبش برابر ۲۵ ضربه می‌باشد. شکل (۷-ب) نشان می‌دهد که اثرات کاهش فاصله‌ی کوبش و افزایش ارتفاع کوبش تقریباً به یک میزان می‌باشند. در شکل (۷-ج) و (۷-د) اثر تعداد ضربات، فاصله‌ی کوبش و وزن کوبه بر روی حداکثر عمق اصلاحی بررسی شده است. اشکال ارائه شده مبین این مطلب است که وزن کوبه تأثیر بیشتری نسبت به تعداد ضربات و فاصله‌ی کوبش دارد که تحقیقات گذشته نیز صحت بر این مطلب است. به نظر می‌رسد فاصله‌ی کوبش ۶ الی ۷ متر برای انرژی‌های کوبش متوسط به بالا عمق کوبش بیشتری را به دست دهد.

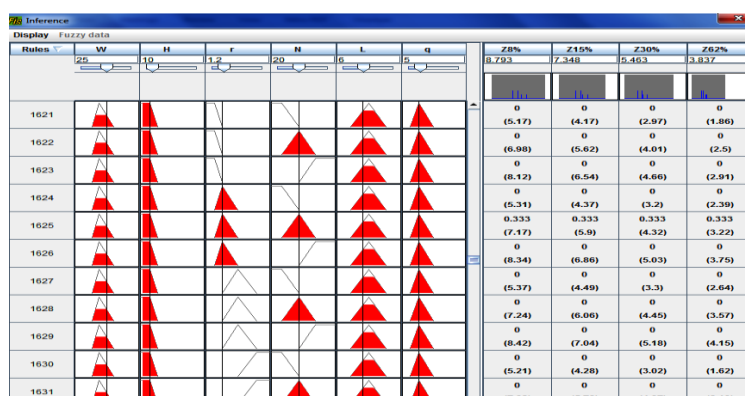
نتایج بررسی شعاع کوبه نشان می‌دهد با افزایش شعاع کوبه، حداکثر عمق اصلاحی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این اثر در انرژی‌های اعمالی بیشتر ( $I_s$ )، مشهودتر است. همان‌طور که در شکل (۸-الف) قابل مشاهده است در انرژی‌های اعمالی کمتر، با افزایش شعاع کوبه، حداکثر عمق اصلاحی افزایش یافته سپس به نقطه‌ی بهینه رسیده و ثابت باقی می‌ماند. این در حالی است که با افزایش انرژی کوبش و شعاع کوبه، حداکثر عمق اصلاحی روند افزایشی دارد. حال اگر مطابق شکل (۸-ب) انرژی اعمالی ( $I_s$ ) افزایش یابد، مقدار بهینه‌ای برای شعاع کوبه به دست خواهد آمد به طوری که افزایش شعاع کوبه به بیشتر از مقدار بهینه، نه تنها سبب افزایش حداکثر عمق اصلاحی نخواهد شد بلکه اثر معکوس نیز خواهد داشت. دلیل این امر را می‌توان به اعمال انرژی کمتر به خاک نسبت داد. بدین صورت که اثر بار کوبه در سطح بیشتری پخش خواهد شد، بنابراین عمق اصلاحی کمتری به دست خواهد آمد. مطالعات نشان می‌دهد که شعاع بهینه‌ی کوبه برای اغلب الگوهای کوبش برابر ۱/۵ تا ۲ متر بوده و استفاده از این محدوده شعاع کوبه سبب به دست آمدن بیشترین عمق بهبود می‌گردد. بنابراین شعاع کوبه‌ی

مناسب‌تری برای اطمینان از کارایی این روش بهسازی می‌باشد. از طرفی مشاهده می‌شود که برای هر فاصله‌ی کوبشی، تعداد ضربه‌ی بهینه وجود دارد به طوری که با افزایش فاصله‌ی کوبش، تعداد ضربه‌ی بهینه نیز افزایش یافته و تعداد ضربات بیشتر از آن تأثیری بر بالا بردن حداکثر عمق اصلاحی ندارد و صرفاً سبب بالا رفتن هزینه و زمان عملیات اجرایی خواهد شد. همان‌طور که در شکل

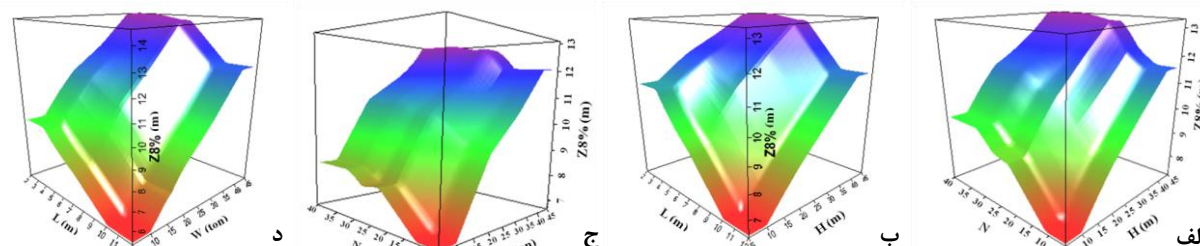
پیشنهادی برای طرح اولیه‌ی الگوی کوبش ۱/۵ الی ۲ متر می‌باشد. شکل (۹) نحوه‌ی تغییرات تعداد ضربات و نوع خاک را در مقابل فاصله‌ی کوبش نشان می‌دهد. مشخص است که کاهش فواصل کوبش اثر بیشتری نسبت به افزایش تعداد ضربات کوبش بر حداکثر عمق اصلاحی دارد و کم کردن فواصل کوبش در مقایسه با افزودن تعداد ضربات، روش



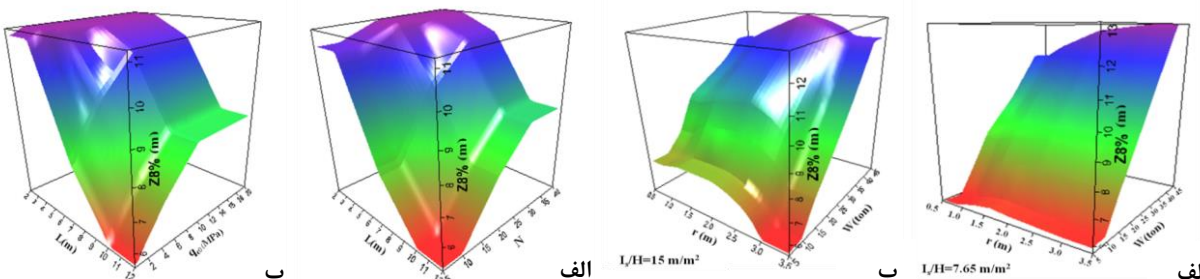
شکل ۶- تأثیر وزن کوبه ( $W$ ) و ارتفاع کوبش ( $H$ ) بر حداکثر عمق اصلاحی خاک ( $Z_{8\%}$ )



شکل ۵- نمونه‌ای از خروجی سیستم فازی



شکل ۷- تأثیر وزن کوبه ( $W$ )، ارتفاع کوبش ( $H$ )، تعداد ضربات ( $N$ ) و فواصل کوبش ( $L$ ) بر حداکثر عمق اصلاحی خاک ( $Z_{8\%}$ )



شکل ۸- تأثیر وزن کوبه ( $W$ ) و شعاع کوبه ( $r$ ) بر حداکثر عمق اصلاحی خاک ( $Z_{8\%}$ )

شکل ۹- تأثیر تعداد ضربات ( $N$ )، فواصل کوبش ( $L$ ) و نوع خاک ( $q_{c0}$ ) بر حداکثر عمق اصلاحی خاک ( $Z_{8\%}$ )

می‌شوند. نتایج در نمودار پارتو در شکل (۱۱) خلاصه شده است.

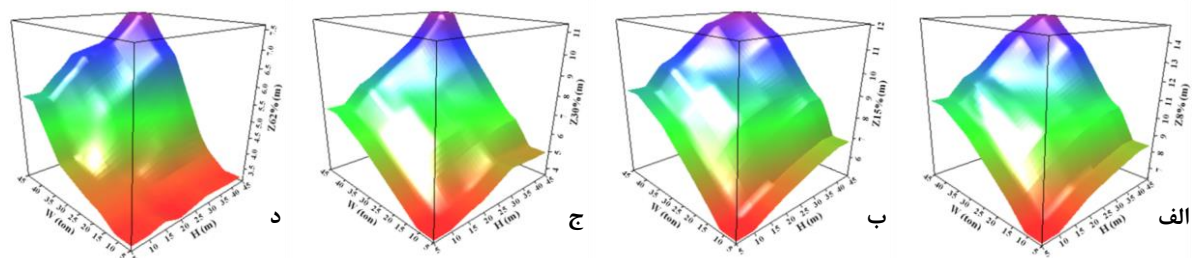
نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۱) مبین مقدار تأثیر متغیرهای ورودی بر دو عمق بهبود نسبی ۸٪ و ۶۲٪ می‌باشند که نشان از اهمیت هرکدام از متغیرها دارد. قابل ذکر است که نتایج اثرات متغیرها در هر دو نمودار نسبت به اثر وزن کوبه در عمق بهبود نسبی ۸٪ نرمالایز شده است. در هر دو شکل (۱۱-الف و ب) مشخص است که وزن کوبه (A) بیشترین تأثیر را داشته و ارتفاع کوبش (B) در درجه دوم اهمیت قرار دارد. همچنین مشاهده می‌شود که فواصل کوبش (F) در درجه سوم اهمیت می‌باشد. این اثرات کاملاً با نتایج تحلیل فازی هم‌خوانی دارد. از طرفی در عمق بهبود نسبی ۸٪، شعاع کوبه (C) کم‌ترین تأثیر را در میان متغیرهای اصلی داراست، این در حالی است که شعاع کوبه در عمق بهبود نسبی ۶۲٪، رده سوم را دارد. دلیل این موضوع را می‌توان به اثرپذیری بالای لایه‌های سطحی خاک ناشی از تغییرات شعاع کوبه دانست، به طوری که با افزایش عمق، اثر تغییرات شعاع کوبه کاهش می‌یابد. به طور کلی می‌توان بیان نمود که اثر تغییرات متغیرهای اصلی در عمق بهبود نسبی ۸٪ بیشتر از عمق بهبود نسبی ۶۲٪ می‌باشد.

همان‌طور که در روابط تجربی نیز ذکر شده است، اندرکنش وزن کوبه و ارتفاع کوبش (AB)، بیشترین نقش را در روش‌های طراحی ایفا می‌کند. این اثر به خوبی در نمودارهای مذکور قابل مشاهده است. نکته‌ی قابل توجه این‌که در عمق‌های بهبود نسبی ۸٪ و ۶۲٪، مقدار تأثیر AB یکسان بوده و این دلیلی بر اعتبار رابطه‌ی تجربی

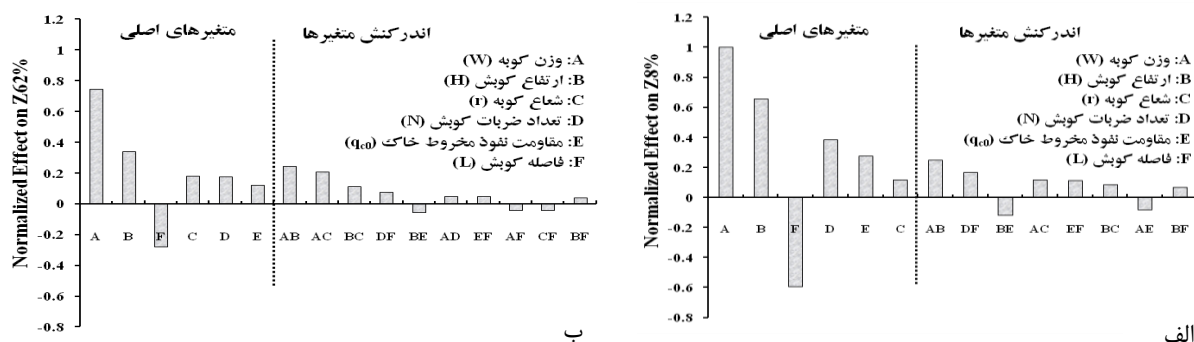
(۹-الف) مشاهده می‌شود تعداد ضربه‌ی کوبش بهینه برای الگوهای کوبش با فواصل کوبش کم برابر ۲۵ ضربه می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود در طرح اولیه‌ی الگوی کوبش در عملیات تراکم دینامیکی از تعداد ضربات کوبش ۲۵ ضربه استفاده شود. در شکل (۹-ب) مشاهده می‌شود که در مقایسه با فواصل کوبش، نوع خاک تأثیر زیادی بر افزایش عمق بهبود ندارد به‌ویژه اگر فواصل کوبش کم باشد، متراکم‌تر شدن خاک تأثیر کمی بر عمق بهبود خواهد داشت.

مقایسه‌ی نمودارهای سه بعدی شکل (۱۰) نشان می‌دهد که با افزایش درجه‌ی بهبود نسبی از ۸٪ به ۶۲٪، عمق بهبود نسبی کاهش داشته است که بیانگر این موضوع است که با افزایش عمق خاک، میزان تغییرات تراکم نسبی کمتر شده و خاک‌های نزدیک‌تر به سطح زمین متراکم‌تر از خاک‌های عمیق‌تر شده است. همچنین در تمام درجات بهبود نسبی، اثر وزن کوبه بیشتر از ارتفاع کوبش می‌باشد که این روند در درجات بهبود نسبی بالاتر، نمایان‌تر است به طوری که در شکل (۱۰-د)، به ویژه در کوبه‌های کم وزن، افزایش ارتفاع کوبش تأثیری بر عمق بهبود نسبی ندارد.

همچنین در این مقاله به منظور کمی‌سازی اثرات پارامترهای ورودی بر روی عمق بهبود نسبی از روش آماری باکس - هانتز [۳۰] استفاده شده است. بدین صورت که اثر اصلی پارامترهای ورودی و اندرکنش آن‌ها با عمق بهبود نسبی، با استفاده از نرم افزار Statgraphics 5.0 Plus [۳۱] و دسته ورودی مذکور، محاسبه



شکل ۱۰- تأثیر وزن کوبه (W) و ارتفاع کوبش (H) بر عمق بهبود نسبی مختلف



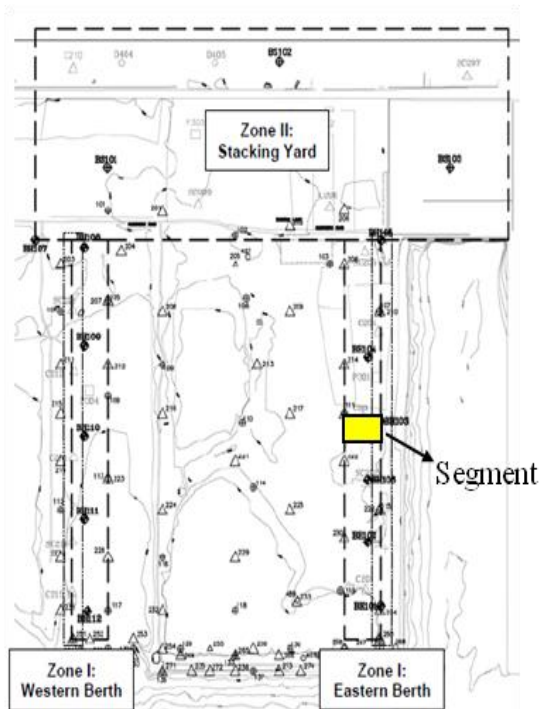
شکل ۱۱- نمودار اثرات متغیرهای اصلی و تعامل متغیرهای ورودی و عمق بهبود نسبی ۸٪ و ۶۲٪ به ترتیب اهمیت

سیلت به همراه رس می‌باشد. سطح آب زیرزمینی در عمق ۶ متری از سطح زمین قرار نزدیک باشد. جهت اعمال تحلیل فازی برای سایت مذکور، نیاز به الگوی کوبشی است که در آن هر شش پارامتر ورودی به روشنی مشخص باشد. به دلیل آن که تراکم دینامیکی در سایت مذکور در فازها و پاس‌های مختلفی انجام گردیده، لذا تلاش شده است تا مقدار میانگینی در تحلیل فازی استفاده گردد. که در نهایت ورودی مدل فازی به صورت جدول (۳) مورد استفاده قرار گرفته است.

[۳۲]  $ID = n\sqrt{W.H}$  می‌باشد که در آن  $ID$  عمق مؤثر کوبش و  $n$  ضریب تجربی است. به علت اینکه اثر تغییرات شعاع کوبه در عمق بهبود نسبی ۶۲٪ (اعماق سطحی) بیشتر است، بنابراین اندرکنش وزن کوبه و شعاع کوبه ( $AC$ ) در عمق بهبود نسبی ۶۲٪ قابل ملاحظه می‌باشد.

### ۶- مطالعه موردی (بندر شهید رجایی)

پس از تحلیل و اعتبارسنجی مدل فازی تهیه شده توسط داده‌های اصلی، در این بخش از مقاله سعی بر آن است تا با استفاده از نتایج تحلیل فازی، عملیات تراکم دینامیکی انجام گرفته بر روی لایه‌های خاک مستعد روانگرایی در پشت دیواره‌های اسکله در مجتمع بندر شهید رجایی (Shahid Rajaei Port Complex Development (SRPCD)) بررسی گردد. بندر شهید رجایی در سواحل خلیج فارس در نزدیکی بندرعباس قرار دارد. این اسکله از دو ناحیه‌ی متفاوت (Zone I, II) تشکیل شده است [۳۳]، ۳۴ و ۳۵]. منطقه مورد بررسی در این مقاله در ناحیه ۱ قرار دارد. این ناحیه شامل دو محدوده به ابعاد ۹۱۰ متر در ۱۰۰ متر واقع در پسکرانه شرقی و غربی با منطقه‌ای در پشت دیواره‌های اسکله برای بارگیری و تخلیه‌ی محموله‌های بار می‌باشد. این پسکرانه‌ها، در کنار آب‌های کم عمق ایجاد شده است و جهت پهلو گرفتن کشتی‌ها و شناورها به اندازه‌ی کافی لایروبی شده است.



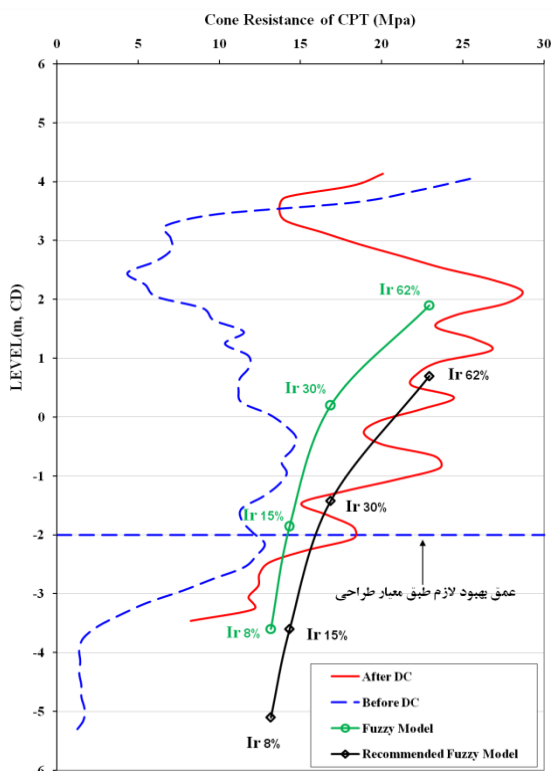
شکل ۱۲- نمای کلی از اسکله‌ی بندر شهید رجایی و نواحی ۱ و ۲ [۳۳]

لایه سطحی ناحیه مورد بررسی (Segment R3L) (شکل (۱۲))، شامل ماسه سیلت دار و لایه‌های پایین‌تر شامل

نسبتاً زیاد در یک الگوی از پیش طراحی شده می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از سیستم فازی، تأثیر پارامترهای دخیل در تراکم دینامیکی بر روی عمق بهبود مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای ورودی سیستم شامل وزن کوبه، ارتفاع کوبش، شعاع کوبه، فواصل کوبش، تعداد ضربات و مقاومت نفوذ مخروط خاک بوده و از چهار عمق بهبود نسبی به عنوان خروجی سیستم برای خاک‌های دانه‌ای سست بهره گرفته شد. پس از ایجاد مدل فازی، جهت صحت‌گذاری تحلیل فازی، نتایج حاصل با نتایج عملیات تراکم دینامیکی معتبر جهان اعتبارسنجی شد.

جدول ۴- الگوی کوبش تراکم دینامیکی مورد استفاده و پیشنهادی در مدل فازی قطعه‌ی R3L

الگوی کوبش	وزن کوبه (تن)	ارتفاع کوبش (متر)	تعداد ضربات	فواصل کوبش (متر)	شعاع کوبه (متر)	مقاومت نفوذ مخروط (مگاپاسکال)
اعمال شده	۱۲	۱۵	۱۸	۳/۵	۱/۳۵	۱۰
پیشنهادی	۳۰	۱۲/۷	۲۵	۶	۱/۷	۱۰



شکل ۱۳- مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی فازی با نتایج میدانی سایت بندر شهید رجایی در قطعه R3L برای مقاومت نفوذ مخروط قبل و بعد از عملیات تراکم

جدول ۳- الگوی کوبش تراکم دینامیکی مورد استفاده در مدل فازی قطعه‌ی R3L

وزن کوبه (تن)	ارتفاع کوبش (متر)	تعداد ضربات	فواصل کوبش (متر)	شعاع کوبه (متر)	مقاومت نفوذ مخروط (مگاپاسکال)
۱۲	۱۵	۱۸	۳/۵	۱/۳۵	۱۰

مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل فازی با نتایج سایت بندر شهید رجایی در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،  $Z(I_r, 8\%)$  فازی تقریباً با نتایج میدانی مطابقت دارد ولی با افزایش  $I_r\%$  این تطابق کمتر می‌شود. علت این امر را می‌توان به متفاوت بودن خاک منطقه و اثر اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت داد. همان‌طور که اشاره شد، مدل فازی تهیه شده، برای خاک‌های ماسه‌ای شل و خشک اعتبار دارد؛ در حالی که خاک این منطقه، مخلوطی از ماسه و سیلت بوده و در اعماق پایین‌تر، لایه‌های سیلنتی به همراه رس نیز دیده می‌شود. همچنین سطح آب زیرزمینی در عمق ۶ متری از سطح زمین قرار دارد. از طرف دیگر به نظر می‌رسد با تغییر الگوی کوبش می‌توان نتایج بهتر و عمق بهبود بیشتر به دست آورد. در این راستا برای یافتن الگوی کوبش بهتر، از توصیه‌های پیشنهادی مطالعه‌ی حاضر استفاده شده است. مقدار انرژی اعمالی در این پروژه برابر  $265 \text{ ton} \cdot \text{m} / \text{m}^2$  ( $AE = W.H.N / L^2$ ) می‌باشد. حال با فرض اعمال انرژی ثابت ( $AE = 265 \text{ ton} \cdot \text{m} / \text{m}^2$ ) از الگوی کوبش جدول (۴) استفاده شده و نتایج آن در مقایسه با الگوی کوبش اعمال شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، علی‌رغم متفاوت بودن خاک منطقه و بالا بودن سطح آب زیرزمینی، نتایج الگوی کوبش پیشنهادی به مراتب بهتر از الگوی کوبش اعمال شده می‌باشد.

## ۷- نتیجه‌گیری

روش تراکم دینامیکی به عنوان یکی از روش‌های بهسازی زمین شامل پرتاب متوالی کوبه‌های سنگین از ارتفاع

الگوهای کوبش برابر ۲۵ ضربه می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود در طرح اولیه‌ی الگوی کوبش در عملیات تراکم دینامیکی از تعداد ضربات کوبش ۲۵ ضربه استفاده شود.

(۴) زمانی که خاک با انرژی‌های بالا متراکم می‌شود، استفاده از فاصله‌ی کوبش بهینه، بهترین جواب را خواهد داد و فاصله‌ی کوبش کمتر از آن تأثیر چندان زیادی در عملکرد سیستم نخواهد داشت. به نظر می‌رسد فاصله‌ی کوبش ۶ الی ۷ متر برای انرژی‌های کوبش متوسط به بالا عمق کوبش بیشتری را به دست دهد.

(۵) نتایج بررسی شعاع کوبه نشان می‌دهد برای هر انرژی کوبشی، شعاع بهینه‌ای وجود دارد به طوری که با افزایش انرژی کوبش، شعاع بهینه نیز افزایش می‌یابد. نکته‌ی قابل توجه اینکه با افزایش تعداد ضربات، شعاع بهینه‌ی کوبه تغییری نمی‌کند که این نتیجه کاملاً قابل انتظار می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد که شعاع بهینه‌ی کوبه برای اغلب الگوهای کوبش برابر ۱/۵ تا ۲ متر بوده و استفاده از این محدوده شعاع کوبه سبب به دست آمدن بیشترین عمق بهبود می‌گردد. بنابراین شعاع کوبه‌ی پیشنهادی برای طرح اولیه‌ی الگوی کوبش ۱/۵ الی ۲ متر می‌باشد.

(۶) کاهش فواصل کوبش اثر بیشتری نسبت به افزایش تعداد ضربات بر روی حداکثر عمق اصلاحی دارد و کم کردن فاصله‌ی ضربات در مقایسه با افزودن تعداد ضربات، روش مناسب‌تری برای اطمینان از کارایی این روش بهسازی می‌باشد.

سپس به صورت مطالعه‌ی موردی، تراکم دینامیکی انجام گرفته در بندر شهید رجایی ایران با استفاده از مدل فازی تهیه شده، تحلیل گردید. به طور کلی می‌توان نتایج حاصل از تحلیل تراکم دینامیکی بر اساس مدل فازی را به شرح ذیل جمع‌بندی نمود:

(۱) تحلیل فازی تراکم دینامیکی، کاربردی نمودن دانش مربوط به عملیات طراحی تراکم دینامیکی در قالب یک نگاشت غیرخطی از ورودی‌های وزن کوبه، ارتفاع کوبش، شعاع کوبه، تعداد ضربات، فواصل کوبش و مقاومت نفوذ مخروط قبل از تراکم به چهار متغیر خروجی عمق بهبود نسبی می‌باشد، به طوری که با استفاده از توانایی‌های قدرتمند سیستم‌های فازی، درجه‌ی اهمیت و تأثیر هر کدام از عوامل مؤثر بر روی یکدیگر و بر روی مقدار عمق بهبود نسبی قابل تشخیص است.

(۲) نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اثرات وزن کوبه بیشتر از ارتفاع کوبش بوده و کاهش فواصل کوبش در درجه‌ی سوم اهمیت می‌باشد.

(۳) در یک شرایط یکسان، ارتفاع کوبش و وزن کوبه همچنان پارامترهای مؤثرتری نسبت به افزایش تعداد ضربات در رسیدن به بیشترین عمق بهبود نسبی می‌باشند. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان نمود که افزایش تعداد ضربات از حد خاصی به بعد موجب پدید آمدن لایه‌ای سخت در زیر محل کوبش می‌شود و افزودن تعداد ضربات، دیگر تأثیری بر عمق بهبود نسبی نخواهد داشت. یعنی برای هر انرژی کوبشی تعداد ضربات بهینه‌ای وجود دارد. مطالعات بر روی تعداد ضربات کوبش نشان از این دارد که تعداد ضربات کوبش بهینه برای اغلب

## ۸- منابع

- [1] Menard, L., Broise, Y. (1975). "Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation". J Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp. 3-16.
- [2] Zadeh, L. A. (1997). "Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic". Fuzzy Sets and Systems, 90, pp. 111-117.
- [3] Najafi, A. (2011). "Prediction of the price transmission performance using fuzzy cognitive maps". Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5, No. 9, pp. 1281-1287.

- [4] Najafi, A., & Afraze, A. (2011). "Analysis of the environmental projects risk management success using analytical network process approach". *International Journal of Environmental Research*, Vol. 5, No. 2, pp. 277-284.
- [5] Najafi, A., & Afraze, A. (2010). "Productivity strategies ranking of knowledge workers". *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, Vol. 5, No. 9, pp. 1281-1287.
- [6] Najafi, A., & Afraze, A. (2010). "Using analytical network process for ranking educational factors influencing on knowledge worker productivity". *World Applied Sciences Journal*, Vol. 9, No. 6, pp. 605-618.
- [7] Xue, X-H., W.H. Zhang and H-J. Liu. (2007). "Evaluation of slope stability based on genetic algorithm and fuzzy neural network". *Rock and Soil Mechanics*, Vol. 28, No. 12, pp. 2643-2648. (In Chinese)
- [8] Chen, Ch-F., Zh-Y, Xiao and G. B, Zhang. (2011). "Stability assessment model for epimetamorphic rock slopes based on adaptive Neuro-fuzzy inference system". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 16, pp. 93-107.
- [9] Monjezi, M. and M Rezaei. (2011). "Developing a new fuzzy model to predict burden from rock geomechanical properties". *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 8, pp. 9266-9273.
- [10] Acaroğlu, O. (2011). "Prediction of thrust and torque requirements of TBMs with fuzzy logic models". *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 26, No. 2, pp. 267-275.
- [11] Alipour, A. and M. Ashtiani. (2011). "Fuzzy modeling approaches for the prediction of maximum charge per delay in surface mining". *Int J Rock Mech Min*, Vol. 48, No. 2, pp. 305-310.
- [12] Kong Wei-Xue., Lu, Xin.,Zheng Y.R. (2002). "Fuzzy predetermination of effective reinforcement depth of dynamic consolidation". *Rock and Soil Mechanics, China*, Vol. 23, No. 6.
- [13] Wang. Yan., Li. X. B., Jiang. W.D. (2003). "Application of fuzzy model of multi-objective system to optimization of parameters of dynamic compaction". *Rock and Soil Mechanics, China*, Vol. 24, No. 3, pp. 410-412.
- [14] Ghazavi. M., Pasdarpour. M., Sadrnejad. S. A. (2006). "Fuzzy system modeling of dynamic compaction in granular soils". *Proceedings of the sixth International Conference on physical Modelling in Geotechnics, Hong Kong*, pp. 4-6.
- [15] Mamdani, E. H., Assilian, S. (1975). "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller". *Int J Man Mach Stud*, 7 (1), pp. 1-13.
- [16] Li-Xin Wang. (1997). "A Course in fuzzy systems and control". Prentice Hall, NJ.
- [17] Sugeno, M., Takagi, T. (1985). "Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control". *IEEE Trans Syst Man Cybern*, No. 15, pp. 116-132.
- [18] Arshdeep, K., Amrit, K. (2012). "Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Fuzzy Inference Systems for Air Conditioning System". *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) ISSN: 2231-2307*, Vol. 2, Issue-2.
- [19] Oshima, A. and Takada, N. (1997). "Relation between compacted area and ram momentum by heavy tamping". *Proceeding, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3, pp. 1641-1644.
- [20] Oshima, A. and Takada, N. (1998). "Evaluation of compacted area of heavy tamping by cone point resistance". *Proceeding of centrifuge 98*, pp. 813-818.
- [21] Lee, F. H. and Gu, Q. (2004). "Method for estimating dynamic compaction effect on sand". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 2, pp. 139-152.
- [22] Lo, K.W. and Ooi, P. L. and Lee, S. March. (1990). "Unified Approach to Ground Improvement by Heavy Tamping". *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 3, pp. 514-523.
- [23] Briaud, J. L., Noubani, A., Kilgore, J., and Tucker, L. M. (1985). "Correlation between pressuremeter data and other parameters". *Civil Engineering Research Report, Texas A&M Univ., Tex.*

- [24] Mayne, P.W., Jones, J.S., Dumas, J.C. (1984). "Ground Response to Dynamic Compaction". ASCE 110, No.GT6, pp. 757-773.
- [25] Lukas, R.G. (1995). "Dynamic compaction". Geotechnical Engineering Circular, No. 1, Publication No. FHWA-SA-95-037, Federal Highway Administration, Office of Engineering, Office of Technology Applications, Washington, DC.
- [26] Gu, Q., Lee, F. H. (2002). "Ground response to dynamic compaction of dry sand". Geotechnique 52, No. 7, pp. 481-493.
- [27] Asli Celikyilmaz, I. Burhan. Turksen. (2009). "Modeling uncertainty with fuzzy logic with recent theory and applications". University of California, Berkeley, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [28] Lee, S. L., Yong, K. Y., Tham, S. W., Singh, J., and Chen, W. P. (1989). "Treatment of examining land by fiberdrains, surcharge and high energy impact". Symposium on the Application of Geosynthetic and Geofibre in South Asia, Selangor, Sect. 5, pp. 18-22.
- [29] Yong, D. M. (1993). "Ground improvement by dynamic compaction". PhD thesis, National Univ. of Singapore, Singapore, pp. 88-91.
- [30] Box, G. E. P., Hunter, J. S. (1978). "Statistics for experimenters". New York, John Wiley and Sons.
- [31] Manguistics Inc. (2000). "Statgraphics 5.0 Plus". User's Guide.
- [32] Lukas, R. G. (1992). "Dynamic compaction engineering consolidations". Grouting/soil improvement and geosynthetics, geotechnical special publication No. 30, Vol. 2, ASCE, New York, pp. 940-953.
- [33] Nouri, H.R., Ali-Elahi, H., Jalili, M., Seyedi, E. (2008). "Evaluation of Empirical Relationships for Dynamic Compaction in liquefiable Reclaimed Silty Sand Layers using Pre/Post Cone Penetration Tests". 6th conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington.
- [۳۴] علی الهی، حمید، (۱۳۸۹). "طراحی دیوارهای دیافراگمی بتنی درجا بر مبنای سطح عملکرد لرزه‌ای آن‌ها". چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، ایران.
- [35] H. Alielahi., H. Nouri., B. Ebrahimian. (2009). "Performance based design of Shahid Rajaei diaphragm wall: pseudo-static and dynamic perspective". International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (ISTokyo2009).