

# تعیین ظرفیت باربری شمع با استفاده از تحلیل‌های عددی سیستماتیک آزمایش بارگذاری شمع بر مبنای روش تاگوجی

محمود یزدانی\* (استادیار)

بیمان قهرمانی منججی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

آزمایش بارگذاری شمع روشی قابل اعتماد ولی گران در تعیین ظرفیت باربری شمع است. عملاً می‌توان با انجام تعداد محدودی آزمایش صحرایی، در کنار به‌کارگیری مدل‌سازی‌های عددی، ظرفیت باربری شمع را با دقت خوبی تعیین کرد. در این پژوهش، با استفاده از روش سیستماتیک تاگوجی، طرح مناسبی برای نحوه تغییر تمامی پارامترهای مؤثر در نتایج تحلیل عددی به‌منظور انطباق نتایج آن با نتیجه‌ی آزمایش بارگذاری شمع ارائه شده است. با این‌کار پارامترهای تدقیق‌شده‌ی خاک و اهمیت نسبی هر یک بر میزان ظرفیت باربری مشخص می‌شود. در این پژوهش، با داشتن پارامترهای مکانیک خاک آزمایشگاهی و همچنین نتایج آزمایش بارگذاری شمع در یک محل، با روش تاگوجی ضمن تدقیق پارامترهای خاک، عامل مقاومتی فصل مشترک، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مهم‌ترین و نسبت پواسون و زاویه‌ی اتساع کم اهمیت‌ترین عوامل تشخیص داده شدند.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری، شمع، آزمایش بارگذاری، تاگوجی.

## ۱. مقدمه

با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌ها، بهتر است ظرفیت باربری آن‌ها به‌صورت درجا تعیین شود. آزمایش بارگذاری شمع بهترین روش مستقیم جهت تعیین باربری شمع‌هاست و بسته به نیاز در اغلب پروژه‌های بزرگ، تعدادی از این آزمایش‌ها انجام می‌شود. معمولاً به ازای هر ۲۵۰ الی ۳۰۰ شمع یک آزمایش انجام می‌شود.<sup>[۱]</sup> تمام تحقیقات قبلی انجام‌شده در زمینه تعیین باربری نهایی شمع بر روی منحنی بار-جابجایی استوار است و برای داشتن این منحنی نیاز به انجام آزمایش‌های صحرایی است. در این پژوهش سعی شده است اطلاعات لازم جهت استفاده از روش‌های تفسیر که همان منحنی بار-جابجایی است با استفاده از روش‌های مناسب مدل‌سازی ایجاد شود. ذکر این نکته ضروری است که روش‌های عددی را نمی‌توان به‌منزله‌ی جایگزین آزمون‌های صحرایی تلقی کرد؛ بلکه فقط به‌منظور کاهش تعداد این آزمایش‌ها در مراحل مقدماتی پروژه‌های بزرگ و کاهش هزینه‌ها در این مرحله می‌توان از این روش استفاده کرد.

از تحقیقات انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی عددی آزمایش بارگذاری شمع می‌توان به مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی شمع با نتایج آزمون‌های سانتریفیوژ شمع اشاره کرد.<sup>[۲]</sup> همچنین در پژوهشی دیگر تأثیر عواملی از قبیل

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۸/۵/۱۳۸۹، اصلاحیه ۲۷/۱۰/۱۳۸۹، پذیرش ۶/۶/۱۳۹۰.

myazdani@modares.ac.ir  
pghahremanim@gmail.com

مشخصات هندسی شمع، المان‌های فصل مشترک و انواع مختلف مش المان محدود بر روی نتایج مدل عددی بررسی و با نتایج آزمایش صحرایی بارگذاری شمع مقایسه شده است.<sup>[۳]</sup>

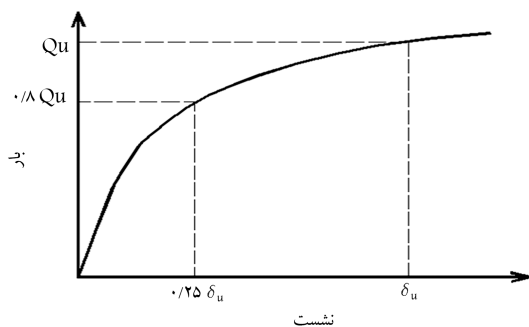
از آنجا که در بیشتر تحقیقات گذشته، مبنای تغییر طرح مدل‌سازی‌ها برای تعیین بهترین شرایط از طریق سعی و خطا بوده، در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش سیستماتیک تاگوجی<sup>[۱]</sup>، طرح مناسبی برای نحوه تغییر تمامی پارامترهای مؤثر بر مدل عددی ارائه شود. مدل‌سازی عددی آزمایش‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار المان محدود دو بعدی PLAXIS V8.۲<sup>۰</sup> انجام شده است که نتیجه‌ی آن، تجزیه و تحلیل‌های متعدد هدف‌دار با شرایط مدل‌سازی مختلف، جهت نزدیک شدن نتایج مدل عددی و نتایج آزمایش‌های صحرایی است. این تذکر لازم است که اطلاعات موردنیاز در این پژوهش، از نتایج آزمایش‌های بارگذاری شمع در محل پروژه‌ی فولاد قانات استخراج شده است.

## ۲. ظرفیت باربری شمع

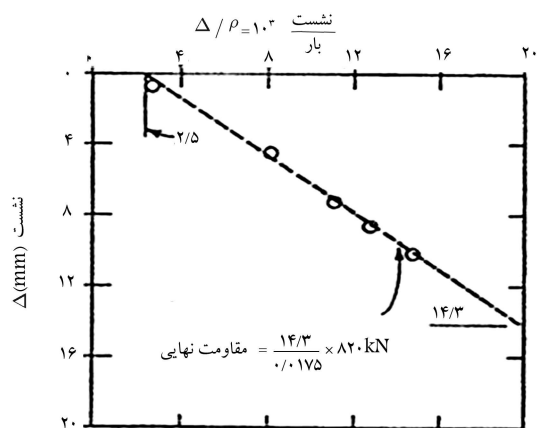
ظرفیت باربری یک شمع، برابر مجموع مقاومت جدار و مقاومت انتهایی آن است که در اثر اعمال بار محوری از طرف خاک اطراف و کف شمع بسیج می‌شوند. هنگامی که شمع تحت بار فشاری قرار می‌گیرد، منحنی بار-تغییر مکان مشابه شکل ۱ خواهد بود.

### ۳.۳. روش دکورت [۴]

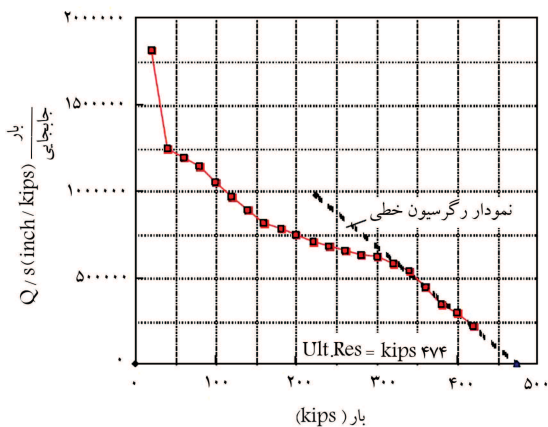
روش دکورت (۱۹۹۸) از لحاظ ساختاری شبیه روش چین است. برای استفاده از این روش، هر بار بر جابجایی نظیر خود تقسیم و نمودار مقدار به دست آمده در مقابل بار نظیر آن ترسیم می‌شود. منحنی ترسیم شده به سمت یک خط مایل میل و محور افقی (بار) را قطع می‌کند. با برازش خطی بر این منحنی، می‌توان خطی را ترسیم کرد که نقطه‌ی تلاقی این خط با محور افقی نشان‌گر بار نهایی است. نمونه‌ی از تعیین بار نهایی به این روش در شکل ۴ نشان داده شده است.



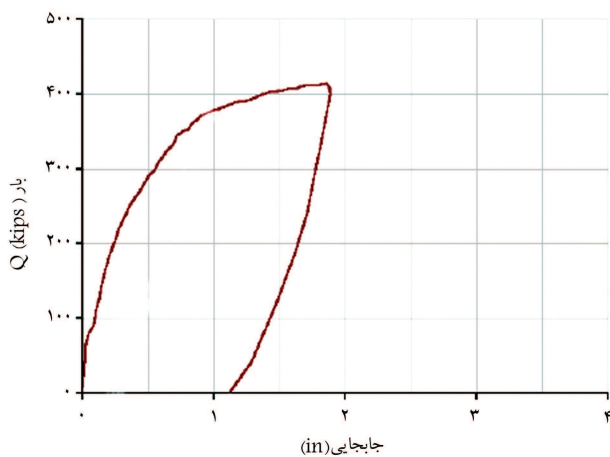
شکل ۲. تعیین بار نهایی شمع در روش هانسن [۱].



شکل ۳. نمونه‌ی تعیین بار نهایی در روش چین [۱].



شکل ۴. نمونه‌ی تعیین بار نهایی در روش دکورت [۴].



شکل ۱. منحنی بار-جابجایی شمع.

به منظور تعیین ظرفیت باربری شمع می‌توان از دو روش کلی استفاده کرد:

۱ روش کلاسیک

۲ انجام آزمایش بارگذاری شمع و تحلیل نتایج آن.

در روش اول از روابط تئوریک پڑوشگرگان مختلف که براساس مکانیزم توزیع تنش، جابجایی، و تشکیل سطوح شکست در ناحیه‌ی اطراف نوک شمع ارائه شده‌اند، استفاده می‌شود. مثلاً می‌توان به روابط ارائه شده‌ی ترزاقی، مایرهورف، و سیک و... اشاره کرد. در این روش لحاظ نکردن اثر عواملی نظیر ناهمسانی محیط خاک در برگزیده‌ی شمع، نحوه‌ی اجرای شمع، جنس شمع، و شکل آن می‌تواند تخمین صحیح ظرفیت باربری شمع با استفاده از روابط تئوریک را با مشکل همراه سازد.

در روش دوم، با انجام آزمایش بارگذاری به تعداد لازم و استفاده از توصیه‌ها و روابط تجربی که در زمینه‌ی تفسیر نتایج ارائه شده‌اند، ظرفیت باربری شمع محاسبه می‌شود. روش‌های چین، دکورت و هانسن از این دسته‌اند که در ادامه، توضیح مختصری در مورد هر یک از آن‌ها ارائه شده است.

### ۳. تفسیر نتایج آزمایش بارگذاری شمع

روش‌های مختلف و متنوعی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها با استفاده از نتایج آزمایش بارگذاری شمع پیشنهاد شده است، که در ادامه به تعدادی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

#### ۳.۱. روش هانسن [۱]

در این روش بار نهایی شمع باری است که در آن میزان تغییرمکان، ۴ برابر تغییرمکان به ازای ۸۰٪ آن بار باشد (شکل ۲).

#### ۳.۲. روش چین [۱]

در روش چین (۱۹۸۳) بار نهایی شیب خطی است که به این طریق رسم می‌شود: ابتدا مقادیر تغییرمکان بر مقدار بار متناظر آن تقسیم و سپس نمودار تغییرمکان بر حسب این مقدار (حاصل تقسیم تغییرمکان بر بار) ترسیم می‌شود. شکل ۳، تعیین بار نهایی را برای شمع اتکالی نشان می‌دهد. نقاط حاصل از این روش تقریباً روی یک خط راست قرار می‌گیرند و شیب خط، باربری نهایی شمع را تعیین خواهد کرد.

جدول ANOVA در تعیین اینکه کدام یک از فاکتورها نیاز به کنترل دارند، کمک زیادی می‌کند.

## ۴. روش تاگوچی

### ۱.۴. معرفی روش

روش طراحی آزمایش‌ها با فاکتورها و سطوح مختلف برای اولین بار در سال ۱۹۲۰ مطرح شد.<sup>[۵]</sup> این روش به‌منزله‌ی طراحی فاکتوریالی آزمایش‌ها معروف است. طرح آزمایش فاکتوریالی کامل، همه‌ی ترکیب‌های ممکن برای گروه مشخصی از فاکتورها را تعیین خواهد کرد. از آنجا که در اغلب آزمایش‌ها، تعداد فاکتورهای تحت بررسی زیاد است، استفاده از طراحی آزمایش‌ها با روش‌های فاکتوریالی کامل منجر به انجام تعداد زیادی از آزمایش‌ها می‌شود. روش مرسوم در کاهش تعداد ترکیب آزمایش‌ها، استفاده از آزمایش‌های فاکتوریالی جزئی<sup>۲</sup> است. اواخر سال ۱۹۴۰، تاگوچی مجموعه‌ی ویژه‌ی از طرح‌های کلی برای آزمایش‌های فاکتوریالی جزئی ایجاد کرده است که اغلب کاربردها را پوشش می‌دهد. آرایه‌های ارتوگونال، جزئی از این مجموعه‌ی طراحی‌هاست. استفاده از این آرایه‌ها ما را در تعیین کمترین تعداد آزمایش‌ها برای مجموعه‌ی از فاکتورها یاری می‌کند.<sup>[۵]</sup> بسته به عملکرد تعیین‌شده، بهترین شرایط برای این نکته اشاره دارد که محصول (تابع هدف) به بیشترین، کمترین، و یا مقدار مشخصه‌ی کیفیت رسیده است. شرایط بهتر در طراحی یک محصول به معنای تعیین ترکیبی درست از اجزاء است، به‌نحوی که بهترین نتایج به‌دست آید.<sup>[۵]</sup> این شرایط با مطالعه‌ی آثار عمده‌ی هر یک از فاکتورها شناسایی می‌شود. آثار عمده، روند کلی تأثیر فاکتورها را نشان می‌دهد. با دانستن و معلوم بودن هدف، سطوح فاکتورهایی که انتظار می‌رود بهترین نتیجه را ایجاد کنند، پیش‌بینی می‌شوند.

شبیه‌سازی‌های تحلیلی در طراحی فرایندهای مهندسی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. به‌منظور دست‌یابی به بهترین پارامترها، همراه با کمترین تعداد بررسی تحلیلی می‌توان از روش تاگوچی استفاده کرد. با وجود اینکه روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی فرایند و طراحی‌ها وجود دارد، روش تاگوچی یگانه روشی است که در آن فاکتورها در سطوح مجزایی استفاده می‌شوند. همچنین این روش در طراحی شرایط آزمایش، تعداد و زمان آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد. استفاده از این روش آماری در مسائل مهندسی روزه‌روز در حال گسترش است. بیشترین کاربرد آن در مهندسی عمران مربوط به مطالعه‌های آزمایشگاهی، به‌ویژه تکنولوژی بتن بوده است. کاربرد این روش، بهینه‌سازی زمان و هزینه از طریق کمیته‌سازی تعداد انجام آزمایش‌ها با یک روند کاری مشخص بوده است.<sup>[۶-۱۱]</sup> این تذکر لازم است که استفاده از این روش در مسائل ژئوتکنیکی و مدل‌سازی‌های عددی بسیار محدود بوده است. مثلاً می‌توان به بهینه‌سازی مدل‌سازی عددی آزمایش نفوذسنج اشاره کرد،<sup>[۱۲]</sup> که در انجام تجزیه و تحلیل حساسیت سیستماتیک برای مدل‌سازی عددی نفوذسنج و تعیین پارامترهای بهینه‌ی خاک از روش مذکور استفاده شده است. در این پژوهش، برای تعیین بهترین ترکیب پارامترهای خاک به‌منظور نزدیک شدن نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایش‌های صحرایی، سهم تأثیر هر یک از فاکتورها و تداخل فاکتورهای مختلف در مدل‌سازی از این روش استفاده شده است.

تاگوچی دو روش برای انجام تحلیل‌ها پیشنهاد می‌کند: در روش اول (روش استاندارد)، نتیجه‌ی یک موقعیت آزمایش و یا مقدار میانگین نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از تکرار یک موقعیت آزمایش تحت اثر عمده و جداول تحلیل واریانس پردازش می‌شود. روش دوم که برای آزمایش‌های همراه با تکرار توصیه می‌شود، استفاده از نسبت سیگنال به نویز (S/N) است. تحلیل واریانس<sup>۳</sup>، عملیات آماری است که برای تعیین درصد سهم هر فاکتور بر روی نتایج اعمال می‌شود. مطالعه و بررسی

### ۲.۴. استراتژی طراحی آزمایش‌ها

تاگوچی برای ارائه‌ی آزمایش‌های خود، گروه‌های ویژه‌ی از آرایه‌های ارتوگونال را ترکیب و ایجاد کرد. وی با ترکیب آرایه‌های ارتوگونال با روشی ثابت، سری جدیدی از آرایه‌های ارتوگونال استاندارد را فراهم کرد که برای تعدادی از موقعیت‌های آزمایشی استفاده می‌شوند. آرایه‌های ارتوگونال، فرایند طراحی آزمایش‌ها را سهولت می‌بخشند. طراحی یک آزمایش شامل انتخاب مناسب‌ترین آرایه‌ی ارتوگونال، تعیین فاکتورها با ستون‌های مناسب و نهایتاً توضیح ترکیب‌هایی از آزمایش‌های مجزا موسوم به شرایط آزمایش است. یک آرایه‌ی ارتوگونال معمولی برای فاکتورهای ۲ سطحی در جدول ۱ نشان داده شده است. این آرایه که با  $L_8$  نشان داده می‌شود، برای طراحی آزمایش‌ها شامل ۷ فاکتور در ۲ سطح به‌کار برده می‌شود و دارای ۸ ردیف و ۷ ستون است. هر ردیف یک موقعیت آزمایش را نشان می‌دهد که در آن سطح هر فاکتور با شماره‌هایی در ردیف موردنظر نشان داده شده‌اند. برای مثال، در ردیف ۱ که مربوط به شرایط آزمایش یک است، تمامی ۷ فاکتور در سطح ۱ استفاده شده‌اند، حال آنکه در شرایط آزمایش دو (ردیف ۲)، ۳ فاکتور اول A، B و C در سطح اول خود و سایر ۴ فاکتور دیگر در سطح دوم خود استفاده شده‌اند. ستون‌های عمودی مربوط به فاکتورهای مشخص‌شده در آزمایش‌اند. هر ستون حاوی چهار حالت از سطح ۱ و چهار حالت از سطح ۲ است. ۲ فاکتور دو سطحی با ۴ روش ترکیب می‌شوند. مثلاً (۱ و ۱)، (۱ و ۲)، (۲ و ۱) و (۲ و ۲). وقتی ۲ ستون یک آرایه، این ترکیب‌ها را در دفعات یکسانی تشکیل دهند، گفته می‌شود که این ستون‌ها، ارتوگونال یا بالانس شده هستند. مثلاً ستون‌های A و B که تمام ترکیب‌های (۱ و ۱)، (۱ و ۲)، (۲ و ۱) و (۲ و ۲) را به تعداد دو بار دارا هستند، ۲ ستون ارتوگونال هستند. باید توجه کرد که هر ۲ ستون از  $L_8$ ، دارای تعداد یکسانی از ترکیب‌های (۱ و ۱)، (۱ و ۲) و (۲ و ۱) و (۲ و ۲) هستند. بنابراین، تمامی ۷ ستون یک  $L_8$  با یکدیگر ارتوگونال هستند.

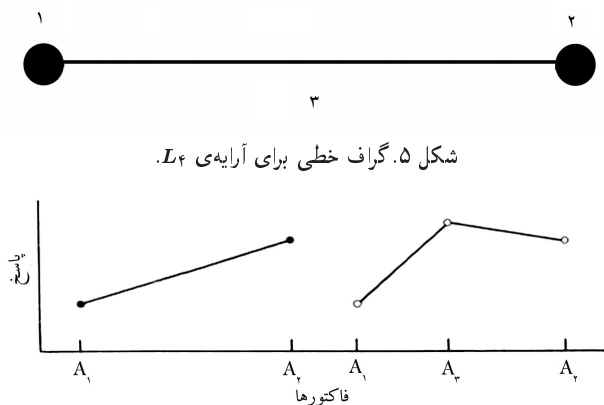
فرض کنید که ۷ فاکتور دو سطحی تحت بررسی باشد. این فاکتورها را A، B، C، D، E، F و G می‌نامیم و آن‌ها را به ترتیب با ستون‌های ۱ تا ۷ از آرایه‌ی  $L_8$  مشخص می‌کنیم. جدول ۱، هشت موقعیت آزمایش به همراه سطح هر فاکتور در هر اجرا را نشان می‌دهد. توصیف شرایط هر آزمایش با خواندن شماره‌های ۱ و ۲ که

جدول ۱. آرایه‌ی ارتوگونال  $L_8$ .<sup>[۵]</sup>

شماره‌ی آزمایش	فاکتورها						
	A	B	C	D	E	F	G
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۲
۴	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۱
۵	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲
۶	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱
۷	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۱
۸	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲

جدول ۲. آرایه‌های ارتوگونال استاندارد روش تاگوچی. [۵]

نوع آرایه	تعداد فاکتورها	سطوح فاکتورها
$L_4 (2^3)$	۳	۲
$L_8 (2^7)$	۷	۲
$L_{12} (2^{11})$	۱۱	۲
$L_{16} (2^{15})$	۱۵	۲
$L_{32} (2^{31})$	۳۱	۲
$L_9 (3^2)$	۴	۳
$L_{18} (2^1, 3^7)$	۱	۲
$L_{27} (3^{12})$	۷	۳
$L_{16} (4^5)$	۵	۴
$L_{32} (2^1, 4^9)$	۱	۲
	۹	۴



شکل ۵. گراف خطی برای آرایه  $L_4$ .

شکل ۶. اثرات عمده و اصلی فاکتوری با ۲ و ۳ سطح.

برای مشخصه‌ی کیفی هر چه کوچک‌تر، بهتر (رابطه‌ی ۲):

$$MSD = \frac{(y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots)}{n} \quad (2)$$

برای مشخصه‌ی کیفی هر چه به مقدار اسمی نزدیک‌تر، بهتر (رابطه‌ی ۳):

$$MSD = \frac{[(y_1 - m)^2 + (y_2 - m)^2 + (y_3 - m)^2 + \dots]}{n} \quad (3)$$

برای مشخصه‌ی کیفی هر چه بزرگ‌تر، بهتر (رابطه‌ی ۴):

$$MSD = \frac{(\frac{1}{y_1} + \frac{1}{y_2} + \frac{1}{y_3} + \dots)}{n} \quad (4)$$

در این روابط،  $n$  تعداد آزمایش‌ها برای رسیدن به یک محصول و  $m$  مقدار اسمی موردنظر برای یک محصول است.

#### ۶.۴. تحلیل واریانس (ANOVA) [۵]

تحلیل واریانس، کمیت‌هایی مانند درجه‌ی آزادی، مجموع مربعات، میانگین مربعات و غیره را محاسبه و آن‌ها را به شکل یک جدول سازمان‌دهی می‌کند. این کمیت‌ها عبارتند از:

$P$  درصد مشارکت،  $r$  نسبت واریانس،  $V$  واریانس،  $T$  مجموع کل (نتایج)،  $S$  مجموع مربعات،  $N$  تعداد آزمایش‌ها،  $S'$  مجموع مربعات خالص،  $C.F.$  فاکتور تصحیح،  $f$  درجات آزادی،  $n$  درجه‌ی آزادی کل.

- **مجموع مربعات:** مجموع مربعات معیاری برای سنجش میزان انحراف نتایج آزمایش‌ها از مقدار میانگین آن است (رابطه‌ی ۵):

$$S_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (5)$$

- **درجه‌ی آزادی (DOF):** تعداد درجه‌های آزادی یک فاکتور برابر است با تعداد سطوح منهای یک.
- **واریانس:** واریانس هر فاکتور برابر نسبت مجموع مربعات کلیه‌ی نتایج آزمایش‌ها بر درجه‌ی آزادی فاکتور است (رابطه‌ی ۶):

$$V_A = S_A / f_A, \quad V_e = S_e / f_e \quad (6)$$

نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی سطح است، تعیین می‌شود. یک آزمایش فاکتوریلی کامل نیاز به ۲ یا ۱۲۸ موقعیت آزمایشی خواهد داشت، ولی اطلاعات بیشتری را ایجاد نخواهد کرد. آرایه‌های پیشنهادی تاگوچی برای تعداد فاکتورهای با سطوح مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

#### ۳.۴. طراحی آزمایش‌های همراه با تداخل

اصطلاح تداخل که با جای‌گذاری علامت (X) بین ۲ فاکتور در تداخل با یکدیگر نشان داده می‌شود، برای توضیح حالاتی است که در آن اثر یک فاکتور بر نتیجه به شرایط سایر فاکتورها بستگی دارد. یافته‌های تاگوچی در زمینه‌ی بررسی آثار تداخل، در جدولی ارائه شده است که به جدول مثلی تداخل معروف است. تاگوچی برای افزایش کارایی طراحی آزمایش‌ها، گراف خطی را براساس جداول مثلی ایجاد کرد. در این گراف‌ها، نقطه‌ی نشان‌دهنده‌ی فاکتور و خط متصل بین دو نقطه، نشان‌دهنده‌ی تداخل بین دو فاکتور است (شکل ۵).

#### ۴.۴. طراحی آزمایش‌ها با سطوح بالاتر

در اغلب موارد حالتی پیش می‌آید که مجبور هستیم آزمایش‌ها را در بیش از دو سطح انجام دهیم. دلیل انتخاب بیش از دو سطح برای یک فاکتور، بررسی تأثیر غیرخطی یک فاکتور بر نتیجه است. اگر فاکتور را در دو سطح در نظر بگیریم، یک خروجی خطی خواهیم داشت. رفتار غیرخطی را مانند شکل ۶، فقط از طریق یک سطح سوم می‌توان نشان داد.

#### ۵.۴. نسبت سیگنال به نویز (S/N) [۵]

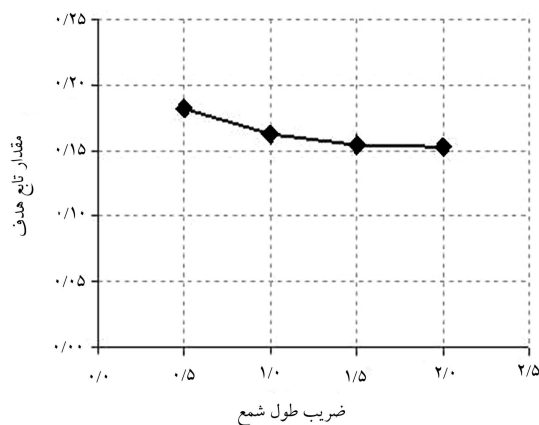
در آزمایش‌های همراه با تکرار از شاخص واریانس استفاده می‌شود که به نسبت سیگنال به نویز (S/N) نیز معروف است. هرچه این مقدار بزرگ‌تر باشد، واریانس محصول حول مقدار مشخصه‌ی کوچک‌تر خواهد بود (رابطه‌ی ۱):

$$S/N = -10 \log_{10} (MSD) \quad (1)$$

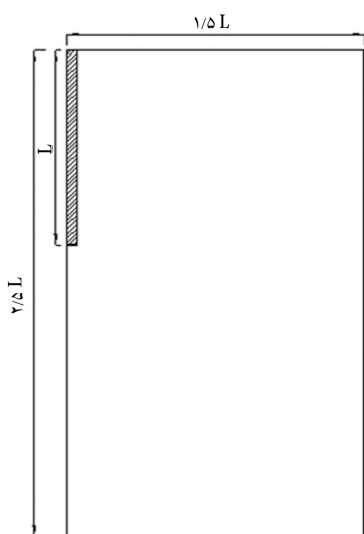
در روش دوم که به روش فنر معروف است، خاک با مجموعه‌یی از فنرهای مستقل که به شمع‌ها متصلند، مدل می‌شود. لازم به ذکر است که این روش قادر به در نظر گرفتن اثرات اندرکنش شمع و خاک و همچنین شمع‌ها در یک گروه شمع نیست. [۱۳]

## ۲.۵. مشخصات مدل عددی

مراحل اصلی برای مدل‌سازی عددی آزمایش بارگذاری شمع شامل ایجاد هندسه‌ی مدل، تعیین شرایط اولیه و مرزی، مدل‌کردن شرایط بارگذاری و مراحل مختلف آن و بالاخره انتخاب مدل رفتاری و خصوصیات مصالح است. به دلیل شکل دایره‌یی مقطع شمع، بارگذاری محوری و همگن بودن محیط خاک در تحلیل‌ها از گزینه‌ی تقارن محوری استفاده شده است. در انتخاب محدوده‌ی مدل سعی شده است که مرزها به اندازه‌ی کافی از محل اتصال اعمال نیروها و تنش‌ها فاصله داشته باشند. براساس تحلیل‌های حساسیت انجام شده (شکل ۷)، محدوده‌ی  $۱٫۵L \times ۲٫۵L$  در طول شمع است (به منزله‌ی ابعاد بهینه‌ی مدل استفاده شده است (شکل ۸)). در شکل ۷ منظور از تابع هدف، سطح محصور بین دو منحنی بار-جابجایی حاصل از آزمایش صحرایی و تحلیل عددی است. جزئیات بیشتر در بخش ۱.۶ ارائه شده است.



شکل ۷. تحلیل حساسیت ابعاد بهینه‌ی مدل.



شکل ۸. ابعاد بهینه‌ی مدل (محدوده‌ی  $۱٫۵L \times ۲٫۵L$ ).

• **مجموع مربعات خالص:** عبارت است از مجموع مربعات منهای حاصل ضرب درجات آزادی در واریانس خطا (رابطه‌ی ۷):

$$S'_A = S_A - f_A \times V_e, \quad S'_e = S_e + (f_A + f_B + f_C) \times V_e \quad (7)$$

• **درصد مشارکت:** سهم هر فاکتور برابر با نسبت مجموع مربعات به مجموع مربعات کل است (رابطه‌های ۸ و ۹):

$$P_A = S_A \times \frac{100}{S_T} \quad (8)$$

$$P_e = S_e \times \frac{100}{S_T} \quad (9)$$

• **نسبت واریانس:** برابر است با نسبت واریانس اثر یک فاکتور و واریانس مربوط به بخش خطا (رابطه‌ی ۱۰):

$$r_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (10)$$

$V_e$  و  $V_A$  به ترتیب واریانس فاکتوری مانند  $A$  و واریانس بخش خطاست. هنگامی که مشارکت یک فاکتور کم باشد، می‌توان مجموع مربعات برای آن فاکتور را با مجموع مربعات خطا  $S_e$  ترکیب کرد. به روش تعدیل کردن مقدار مشارکت فاکتورهای دیگر، ادغام کردن می‌گویند. مثلاً برای فاکتور  $A$  با میزان مشارکت کم، اگر واریانس این فاکتور به بخش خطا اضافه شود، واریانس جدید به صورت رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$V_e = \frac{(S_B + S_e)}{(f_B + f_e)} \quad (11)$$

## ۷.۴. دامنه‌ی اطمینان<sup>۶</sup> نتایج [۵]

اگر تخمین مجموعه‌ی نتایج را با علامت  $E(m)$  نشان دهیم، سطح اطمینان برای مقدار میانگین به صورت رابطه‌ی ۱۲ است:

$$C.I.(m) = E(m) \pm \sqrt{\frac{r_\alpha(f_1, f_2) \times V_e}{n_e}} \quad (12)$$

در این رابطه،  $r_\alpha(f_1, f_2)$  نسبت واریانس برای درجه‌ی آزادی  $f_1$ ؛  $f_2$ ؛  $f_1$  درجه‌ی آزادی میانگین؛  $f_2$  درجه‌ی آزادی خطا؛  $n_e$  تعداد پاسخ‌های معادل است که از رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$n_e = \frac{n}{f_m + f_A} \quad (13)$$

## ۵. مدل‌سازی عددی آزمایش بارگذاری شمع

### ۱.۵. تحلیل رفتار شمع و خاک

به طور کلی روش‌های تحلیل رفتار شمع و خاک را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم بندی کرد:

روش اول بر مبنای استفاده از روش‌های عددی شامل المان محدود و المان مرزی است که در آن ماهیت پیوستگی خاک در نظر گرفته شده و در فرمول‌ها لحاظ شده است. همچنین مدل‌های رفتاری پیچیده برای در نظر گرفتن رفتار خاک استفاده می‌شود. [۱۳]

اعمال بار در مدل عددی به صورت نشست تدریجی در نظر گرفته شده است. [۱۶، ۱۵] همچنین تغییر مکان مرزهای مدل در جهت‌های افقی و قائم مقید شده است.

مهم‌ترین مدل‌های رفتاری که در برنامه‌ی PLAXIS قابل استفاده‌اند، شامل: مدل کشسان<sup>۷</sup>، مدل سنگ درزه‌دار<sup>۸</sup>، مدل موهر-کولمب<sup>۹</sup>، مدل خاک نرم‌شونده<sup>۱۰</sup>، مدل خاک سخت‌شونده<sup>۱۱</sup> و مدل خاک نرم‌شونده‌ی خزشی<sup>۱۲</sup> است. [۱۴] در این پژوهش، شمع به صورت یک مصالح مجزا، بدون تداخل و رفتار آن به صورت کشسان خطی مدل می‌شود. همچنین رفتار خاک با استفاده از مدل موهر-کولمب که به صورت ارتجاعی-خمیری کامل با پارامترهای ارتجاعی E و  $\nu$  و پارامترهای خمیری C،  $\varphi$  و  $\Psi$  است، در نظر گرفته شده است.

## ۶. تدقیق پارامترهای مؤثر بر مدل‌سازی آزمایش بارگذاری

### شمع

#### ۱.۶. تعریف مسئله

معلومات مسئله شامل نمودار بار-جابجایی حاصل از آزمایش صحرایی و مدل‌سازی عددی برای شمع‌های با قطر ۸۰ cm است؛ نمودار دوم ثابت نیست و با تغییر پارامترهای خاک تغییر می‌یابد. هدف از این پژوهش پیدا کردن مجموعه‌ی پارامترهای مکانیکی و مقاومتی خاک است، به طوری که باعث شود این دو منحنی تا حد امکان بر هم منطبق شوند. برای حل مسئله احتیاج به کمیتی است که نشان‌دهنده‌ی درجه‌ی انطباق دو منحنی بر هم باشد. این کمیت را می‌توان با یک تابع هدف که سطح محصور بین دو منحنی است، تعریف کرد (رابطه‌ی ۱۴). این مفهوم در شکل ۹ نشان داده شده است.

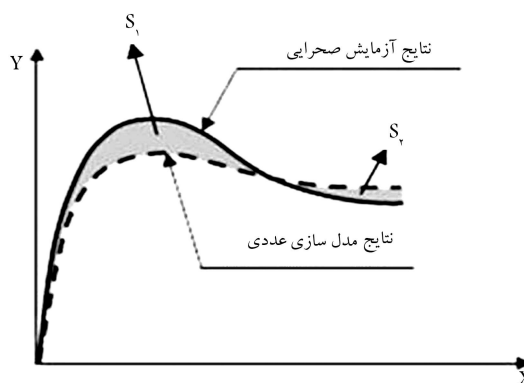
$$Target Function = S_1 + S_2 =$$

$$\int |Y_{Experimental} - Y_{Numerical}| dx \quad (14)$$

هرگاه مجموع مساحت بین دو منحنی کمینه شود، به منزله‌ی کمینه‌بودن تابع هدف و تدقیق‌بودن پارامترهای تحلیل عددی است (رابطه‌ی ۱۵).

$$Target Function = f(\vec{X}) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0 \rightarrow \vec{x} = ?$$

(۱۵)



شکل ۹. مفهوم تابع هدف.

در این رابطه،  $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  بردار فاکتورهای مؤثر بر نتیجه‌ی مدل عددی است. براساس بررسی‌های اولیه‌ی انجام‌شده، تعداد ۶ فاکتور مؤثر بر روی مدل عددی شناسایی شده است که شامل این موارد است:

- مشخصات ارتجاعی خاک شامل مدول کشسانی و نسبت پواسون؛
- مشخصات مقاومتی خاک شامل زاویه‌ی اصطکاک داخلی، زاویه‌ی اتساع و چسبندگی خاک؛
- عامل مقاومتی المان فصل مشترک.

## ۲.۶. روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها

طرح آرایه‌های متعامد استاندارد تاگوچی با تعداد داده‌های نسبتاً کم و دقت مناسب در تخمین اثرات عوامل مختلف در جریان انجام آزمایش‌ها به منزله‌ی راهکار مناسب استفاده شده است. در این پژوهش، آزمایش‌ها همان مدل‌های عددی‌اند و هدف تدقیق فاکتورهای مختلف مؤثر بر نتایج هر مدل عددی به منظور کمینه‌سازی تابع هدف است. همچنین تأثیر متقابل بین فاکتورهای مختلف نیز در این پژوهش بررسی و طراحی آزمایش‌ها در دو بخش جداگانه انجام شده است. در بخش اول، برای بررسی اهمیت نسبی، میزان مشارکت هر یک از پارامترها بر روی نتایج و همچنین تداخل پارامترها، تمامی فاکتورها در دو سطح شده‌اند. دلیل اصلی برای در نظر گرفتن طراحی بخش اول، پیشنهادها تاگوچی برای بررسی تداخل فاکتورهاست که لزوماً فاکتورهای موردنظر باید ۲ سطحی باشند. در بخش دوم برای بررسی دقیق‌تر مسئله و در نظرگیری تأثیر غیرخطی هر یک از پارامترها، تعداد ۴ سطح برای فاکتورها لحاظ شده است.

## ۳.۶. طراحی آزمایش‌ها با فاکتورهای ۲ سطحی

جدول ۳، فاکتورهای موردبررسی به همراه سطوح مربوط را نشان می‌دهد. ملاک تعیین سطوح ۱ و ۲، گزارش مطالعه‌های خاک انجام‌شده در سایت فولاد قانات است که برای هر یک از پارامترهای مکانیکی و مقاومتی خاک محدوده‌های مشخصی ارائه شده است. در این پژوهش، هدف تدقیق هر یک از این پارامترها در محدوده‌ی ارائه‌شده است. آزمایش موردبررسی دارای ۱۰ درجه‌ی آزادی است و آرایه‌ی  $L_{16}$  می‌تواند نیاز ما را برای طراحی آزمایش‌های بخش اول برآورده سازد. در طراحی آزمایش با تداخل ۶ فاکتور اصلی و ۴ فاکتور تداخل لحاظ شده است. اگر برای بررسی مسئله‌ی حاضر از روش فاکتوربندی کامل استفاده شود، نیاز به  $10^4$  ( $2^{10}$ ) موقعیت آزمایش خواهیم داشت. گراف خطی برای بررسی آثار تداخل فاکتورها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل، خط‌های توپر بیان‌گر تداخل بین دو فاکتور و خط‌چین نشانه‌ی عدم تداخل است. همچنین هر گره، بیان‌گر ۱ فاکتور است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، تعداد ۱۰ فاکتور اصلی و فرعی در طراحی آزمایش‌های ۲ سطحی در نظر گرفته شده است که هر یک از این فاکتورها، ۱ گره را به خود اختصاص داده است.

مطابق جدول ۴، فاکتور F با سطوح در نظر گرفته‌شده، سهم بسیار بالایی را در تغییر نتایج به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین، در ادامه‌ی تحلیل‌ها و به منظور افزایش دقت، سطح ۲ با مقدار  $R_{inter} = 0.7$  جایگزین شده است. جدول ANOVA مطابق جدول ۵ برای آزمایش‌های ۲ سطحی اصلاح شده ارائه شده است. بر این اساس آثار عمده‌ی فاکتورها با سطح جدید در نظر گرفته‌شده برای فاکتور F در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ترکیب تدقیق‌شده‌ی فاکتورها با اصلاح سطح عامل مقاومتی فصل مشترک، ترکیب  $A_1B_1C_1D_1E_1F_2$  است.

جدول ۳. فاکتورهای مورد بررسی در طراحی آزمایش‌های ۲ سطحی.

ردیف	فاکتور	واحد	تعداد سطح	سطح ۱	سطح ۲
۱	زاویه اصطکاک داخلی خاک (A)	°	۲	۱	۴
۲	زاویه اتساع (B)	°	۲	۰	۱
۳	چسبندگی خاک (C)	KPa	۲	۳۰	۴۰
۴	مدول کشسانی (D)	MPa	۲	۱۵٫۵	۲۲
۵	نسبت پواسون (E)	-	۲	۰٫۳۵	۰٫۴۳
۶	عامل مقاومتی فصل مشترک (F)	-	۲	۰٫۹	بدون فصل مشترک
۷	A×D	-	۲	۱	۲
۸	A×F	-	۲	۱	۲
۹	C×F	-	۲	۱	۲
۱۰	D×F	-	۲	۱	۲

جدول ۴. جدول ANOVA برای آزمایش‌های ۲ سطحی.

ردیف	فاکتور	درجه‌ی آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	درصد مشارکت
۱	(A)	۱	۰٫۱۶۸	۰٫۱۶۸	۱۱۹٫۴	۴٫۰۹
۲	(B)	۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۳۶۷	-۰٫۰۲
۳	(C)	۱	۰٫۲۵۵	۰٫۲۵۵	۱۸۱٫۵۴۷	۶٫۲۳
۴	(D)	۱	۰٫۱۰۹	۰٫۱۰۹	۷۷٫۶۳۵	۲٫۶۴
۵	(E)	۱	۰٫۰۱۱	۰٫۰۱۱	۷٫۹۱۵	۰٫۲۴
۶	(F)	۱	۳٫۴۶	۳٫۴۶	۲۴۵۷	۸۴٫۷۶
۷	A×D	۱	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۸	۶٫۰۱۳	۰٫۱۷
۸	A×F	۱	۰٫۰۱۵	۰٫۰۱۵	۱۰٫۹	۰٫۳۴
۹	C×F	۱	۰٫۰۱۹	۰٫۰۱۹	۱۳٫۷۵۴	۰٫۴۴
۱۰	D×F	۱	۰٫۰۲۵	۰٫۰۲۵	۱۸۰٫۹۲	۰٫۵۹
۱۱	خطا	۵	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۱	۱	۰٫۵۲
۱۲	مجموع	۱۵	۴٫۰۸۱			۱۰۰

جدول ۵. جدول ANOVA برای آزمایش‌های ۲ سطحی اصلاح شده (پس از ادغام).

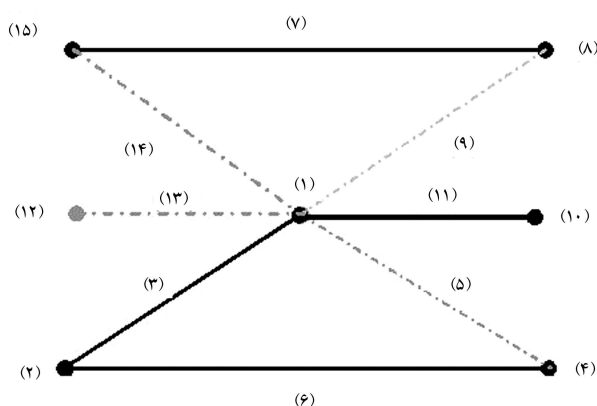
ردیف	فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	درصد مشارکت
۱	(A)	۱	۰٫۰۳۶	۰٫۰۳۶	۶٫۴۰۱	۱۳٫۵۸
۲	(B)					ادغام
۳	(C)	۱	۰٫۰۵۲	۰٫۰۵۲	۹٫۱۰۴	۲۰٫۳۷
۴	(D)	۱	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱۶	۲٫۸۳۲	۴٫۶۰
۵	(E)					ادغام
۶	(F)	۱	۰٫۰۴۴	۰٫۰۴۴	۷٫۶۴۱	۱۶٫۶۹
۷	A×D					ادغام
۸	A×F	۱	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۸	۱٫۵۲۸	۱٫۳۲
۹	C×F	۱	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۳٫۲۶۴	۵٫۶۹
۱۰	D×F					ادغام
۱۱	خطا	۹	۰٫۰۵۱	۰٫۰۰۵۷	۱	۳۷٫۷۱
۱۲	مجموع	۱۵	۰٫۲۲۹			۱۰۰

### ۱.۳.۶. مشارکت نسبی متغیرها

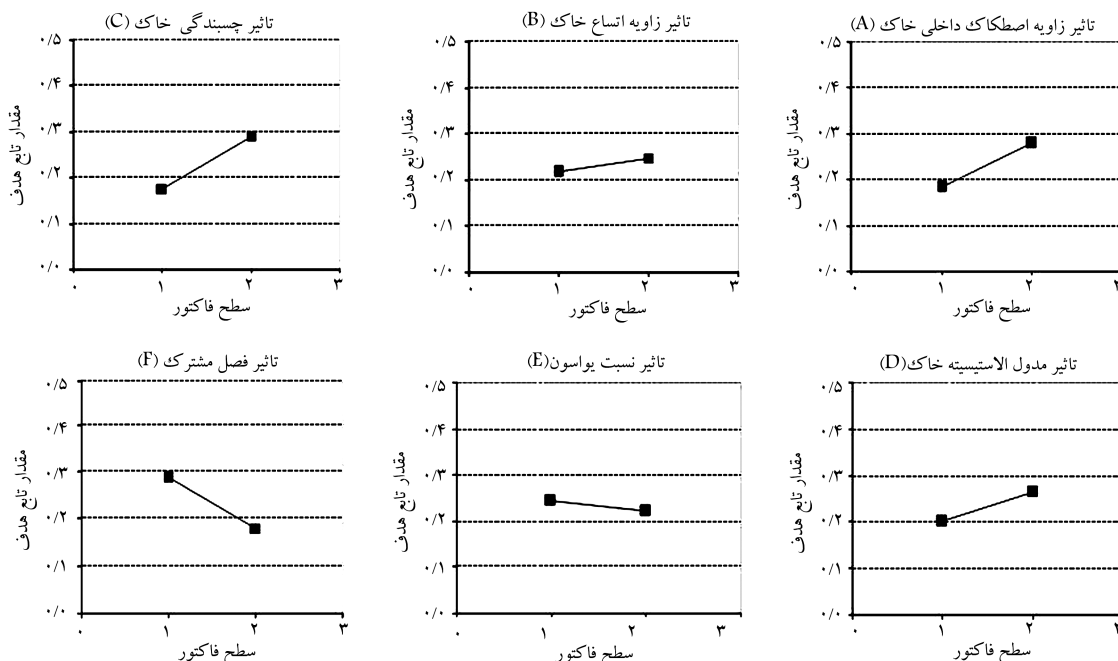
درصد مشارکت هر یک از فاکتورها در جدول ۴ نشان داده شده است. از طرفی با بررسی آثار عمده‌ی فاکتورهای تداخل، فاکتورهای A×D و D×F کمترین تداخل و فاکتورهای A×F و C×F دارای بیشترین آثار تداخل هستند.

### ۴.۶. طراحی آزمایش‌های با ۴ سطح

به منظور بررسی آثار غیرخطی فاکتورها و افزایش دقت در پیش‌بینی ترکیب تدقیق شده، طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح استفاده شده است. بدین منظور آرایه‌ی ارتوگونال استاندارد L<sub>۲۲</sub> استفاده می‌شود. جدول ۶ سطوح فاکتورهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. تحلیل‌های مربوط به طراحی با ۴ سطح به ۲ صورت انجام شده است. در حالت اول، هر موقعیت آزمایش یک بار انجام شده است و از روش تحلیل استاندارد استفاده شده است. در حالت دوم، ۲ بار تکرار در هر موقعیت آزمایشی انجام شده است تا



شکل ۱۰. گراف خطی L<sub>۱۶</sub>. [۵]



شکل ۱۱. آثار عمده‌ی فاکتورهای اصلی در طراحی آزمایش‌های ۲ سطحی.

جدول ۶. سطوح فاکتورها در طراحی آزمایش با ۴ سطح.

ردیف	فاکتور	واحد	تعداد سطح	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
۱	زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (A)	°	۴	۱	۳	۵	۶
۲	زاویه‌ی اتساع (B)	°	۴	۰	۰٫۲۵	۰٫۵	۱
۳	چسبندگی خاک (C)	KPa	۴	۲۵ - ۳۰	۳۰ - ۳۵	۳۵ - ۴۰	۴۰ - ۴۵
۴	مدول کشسانی (D)	MPa	۴	۱۲ - ۱۵	۱۵ - ۱۸٫۵	۱۸٫۵ - ۲۲	۲۲ - ۲۵
۵	نسبت پواسون (E)	-	۴	۰٫۳۲ - ۰٫۳۵	۰٫۳۵ - ۰٫۳۸	۰٫۳۸ - ۰٫۴۱	۰٫۴۱ - ۰٫۴۵
۶	عامل مقاومتی فصل مشترک (F)	-	۴	۰٫۷	۰٫۸	۰٫۹	۱

جدول ۷. سطوح فاکتورها برای طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و بدون تکرار.

ردیف	فاکتور	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
۱	(A)	°	۱	۳	۵	۶
۲	(B)	°	۰	۰٫۲۵	۰٫۵	۱
۳	(C)	KPa	۲۹	۳۴	۳۹	۴۴
۴	(D)	MPa	۱۴	۱۷٫۵	۲۱	۲۴
۵	(E)	-	۰٫۳۴	۰٫۳۷	۰٫۴	۰٫۴۴
۶	(F)	-	۰٫۷	۰٫۸	۰٫۹	۱

-- مشارکت نسبی متغیرها: مانند تحلیل‌های مربوط به فاکتورهای ۲ سطحی، سهم نسبی هر فاکتور با تحلیل واریانس در قالب جدول (ANOVA) محاسبه شده است. همان‌طور که در جدول ۸ مشخص است، فاکتورهای چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و عامل مقاومتی فصل مشترک بیشترین تأثیر را بر روی نتایج دارند.

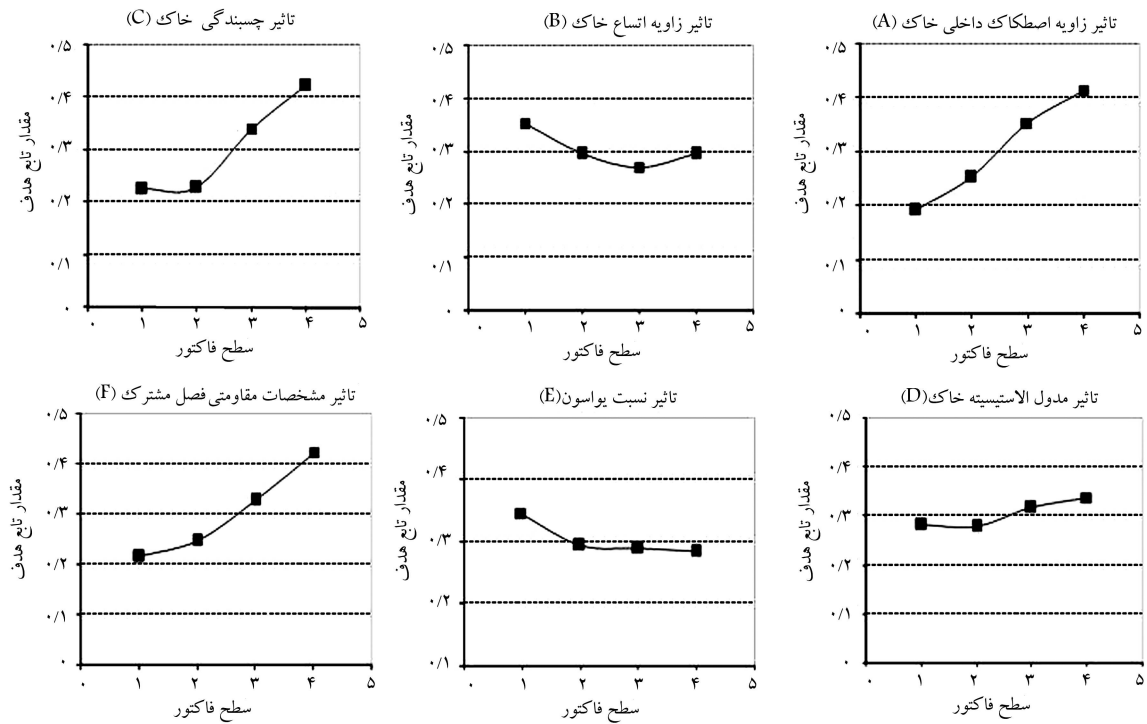
تأثیر تغییر حدود در یک سطح مشخص نیز ارزیابی شود. در این حالت برای تحلیل نتایج از ۲ روش استاندارد و روش (S/N) استفاده شده است.

#### ۱.۴.۶. طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و بدون تکرار

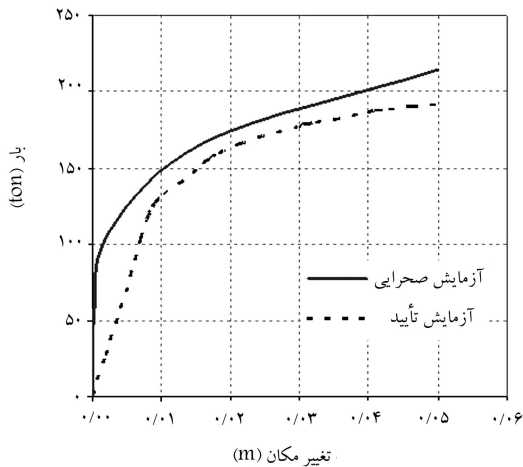
آرایه‌ی  $L_{12}$  دارای ۱۰ ستون است که در این تحقیق فقط ۶ ستون از این آرایه استفاده می‌شود. سطوح مورد استفاده برای طراحی آزمایش‌های بدون تکرار در جدول ۷ ارائه شده است.

-- بررسی آثار عمده‌ی فاکتورها: در آزمایش‌های بدون تکرار از روش تحلیل استاندارد برای ارزیابی نتایج (درصدهای مشارکت) استفاده شده است. اثرات عمده‌ی هر فاکتور در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با بررسی فاکتورها در سطوح بیش از ۳ سطح، تغییر غیرخطی اثر فاکتورها بر روی نتایج مشخص می‌شود. بر این اساس ترکیب تدقیق‌شده‌ی فاکتورها ترکیب  $A_1B_2C_2D_2E_2F_1$  است. این ترکیب مربوط به هیچ‌کدام از موقعیت‌های آزمایش نیست. عملکرد بهینه با استفاده‌ی آثار عمده‌ی فاکتورها برابر ۰٫۰۵ به دست می‌آید.





شکل ۱۲. آثار عمده‌ی فاکتورهای اصلی در طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و بدون تکرار.



شکل ۱۳. انجام آزمایش تأیید در شرایط بهینه در طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و بدون تکرار.

براین اساس، اختلاف ۰٫۰۶ بین مقدار عملکرد بهینه محاسبه شده و آزمایش تأیید قابل قبول است. لیکن با توجه به پیشنهادات تاگوچی مبنی بر انجام آزمایش‌ها همراه با تکرار برای افزایش میزان دقت محاسبات، تحلیل‌های بخش بعدی (تحلیل‌های با تکرار) انجام شده است.

علت تفاوت ظاهری روند تغییرات فاکتور F در تحلیل‌های ۲ سطحی و ۴ سطحی، تفاوت مقادیر سطوح در نظر گرفته شده است. تحلیل‌های ۲ سطحی به ترتیب با سطوح ۰٫۰۹ و ۰٫۰۷ انجام شده است (بیشتر به کمتر)، در حالی که تحلیل‌های ۴ سطحی، برعکس آن به ترتیب با سطوح ۰٫۰۷، ۰٫۰۸، ۰٫۰۹ و ۰٫۱ (کمتر به بیشتر) انجام شده‌اند. با این حال، هر دو تحلیل‌های ۲ سطحی و ۴ سطحی روند یکسانی را نشان می‌دهند.

جدول ۸. جدول ANOVA مربوط به تحلیل استاندارد در طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و بدون تکرار.

ردیف	فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	درصد مشارکت
۱	(A)	۳	۰٫۲۳۷	۰٫۰۷۹	۱۶٫۳۹۹	۲۶٫۴۸
۲	(B)	۳	۰٫۲۹۷	۰٫۰۹۹	۲٫۰۵۷	۱٫۸۲
۳	(C)	۳	۰٫۲۶۸	۰٫۰۸۹	۱۸٫۵۴۹	۳۰٫۱۸
۴	(D)	۳	۰٫۱۹۷	۰٫۰۶۵	۱٫۳۶۶	۰٫۶۳
۵	(E)	۳	۰٫۰۲	۰٫۰۰۶۶	۱٫۳۸۳	۰٫۶۶
۶	(F)	۳	۰٫۲۰۳	۰٫۰۶۷۷	۱۴٫۰۵۳	۲۲٫۴۵
۷	خطا	۱۳	۰٫۰۶۲۶	۰٫۰۰۴۸	۱	۱۷٫۷۷
۸	مجموع	۳۱	۰٫۸۴			۱۰۰

— آزمایش تأیید: نتیجه‌ی بهینه‌ی به دست آمده از انجام آزمایش با ترکیب  $A_1B_2C_2D_2E_2F_1$  برابر ۰٫۱۱ است. چنانچه اختلاف تابع هدف در ترکیب تدقیق شده و آزمایش تأیید کمتر از دامنه‌ی اطمینان باشد، تحلیل‌ها از دقت خوبی برخوردارند و در غیراین صورت نیاز به تحلیل‌های دقیق‌تری است (شکل ۱۳).

— تعیین دامنه‌ی اطمینان: دامنه‌ی اطمینان مربوط به طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و بدون تکرار به صورت رابطه‌ی ۱۶ محاسبه شده است:

$$C.I. = \pm \sqrt{\frac{F_{\alpha}(1, n_e) \times V_e}{N_e}}$$

$$\alpha = 95\%, \quad n_e = 13, \quad N_e = 168, \quad V_e = 0.0048,$$

$$C.I. = \pm 0.106 \quad (16)$$

### ۲.۴.۶. طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و تکرار با ۲ آزمایش

فاکتورها و سطوح مورد استفاده برای طراحی آزمایش‌های با تکرار در جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

در آزمایش‌های همراه با تکرار به علت بالا بودن درجه‌ی آزادی خطا، واریانس خطا نسبت به تحلیل‌های بدون تکرار کاهش می‌یابد.

-- روش تحلیل S/N: در روش سیگنال به نویز از مقادیر S/N در هر موقعیت آزمایشی استفاده می‌شود. درحقیقت، در S/N نوعی تغییر متغیر صورت می‌گیرد. اثرات عمده‌ی هر فاکتور در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این روش برای تمامی مشخصه‌های کیفیت، هر چه مقدار S/N بیشتر باشد، حالت بهینه‌تری به دست می‌آید. بر این اساس، سطوح بهینه‌ی فاکتورها، ترکیب پیشنهادی روش استاندارد است. ترکیب پیشنهادی در این روش، کاملاً منطبق بر ترکیب پیشنهادی روش استاندارد است. عملکرد بهینه در این حالت برابر ۰/۰۷ به دست می‌آید.

۱. مشارکت نسبی متغیرها: مشابه بخش‌های قبل، در این قسمت جدول ANOVA به روش S/N ارائه می‌شود. در این تحلیل‌ها به علت بالا رفتن درجه‌ی آزادی بخش خطا، واریانس تغییرات خطا کاهش می‌یابد (جدول ۱۲).

جدول ۱۱. جدول ANOVA مربوط به تحلیل استاندارد در طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و تکرار.

ردیف	فاکتور آزادی	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	درصد مشارکت
۱	(A)	۳	۰/۱۹۴	۰/۰۶۴۷	۴۲/۶۷۸	۲۵/۶۴
۲	(B)	۳	۰/۰۳۰۷	۰/۰۱۰۲	۶/۷۵۷	۳/۵۴
۳	(C)	۳	۰/۱۸۷	۰/۰۶۲۳	۴۱/۰۸۲	۲۴/۶۶
۴	(D)	۳	۰/۰۶۹۹	۰/۰۲۳۳	۱۵/۳۶۴	۸/۸۴
۵	(E)	۳	۰/۰۲۲۹	۰/۰۰۷۶۵	۵/۰۴۴۷	۲/۴۹
۶	(F)	۳	۰/۱۶۶	۰/۰۵۵۵	۳۶/۵۸۵	۲۱/۸۹
۷	خطا	۴۵	۰/۰۶۸۲	۰/۰۰۱۵	۱	۱۲/۹۲
۸	مجموع	۶۳	۰/۷۳۹			۱۰۰

جدول ۱۲. جدول ANOVA مربوط به تحلیل S/N در طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و ۲ بار تکرار.

ردیف	فاکتور آزادی	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	درصد مشارکت
۱	(A)	۳	۲۲۲/۶۸	۷۴/۲۳	۹/۲۸	۲۵/۷۸
۲	(B)	۳	۱۵/۹۲	۵/۳۰۷	۰/۶۶۳	-۱/۰۵
۳	(C)	۳	۲۰۷/۲۹۴	۶۹/۰۹	۸/۶۳۹	۲۳/۷۹
۴	(D)	۳	۲۱/۵۳۷	۷/۱۸	۰/۸۹۷	-۰/۳۲
۵	(E)	۳	۱۹/۶۹۶	۶/۵۶۵	۰/۸۲	-۰/۵۶
۶	(F)	۳	۱۴۶/۲۴	۴۸/۷۴۷	۶/۰۹۴	۱۵/۸۶
۷	خطا	۴۵	۳۵۹/۹۳	۷/۹۹۸	۱	۶۵/۳۹
۸	مجموع	۶۳	۷۷۰/۶۲۳			۱۰۰

-- روش تحلیل استاندارد: مانند تحلیل‌های انجام شده در بخش‌های قبل، در روش تحلیل استاندارد، بررسی و تحلیل نتایج براساس مقادیر میانگین نتایج آزمایش‌ها انجام می‌شود.

۱. بررسی آثار عمده‌ی فاکتورها: براساس مشخصه‌ی کیفیت هر چه کمتر، بهتر، سطوح بهینه‌ی فاکتورها ترکیب  $A_1B_2C_2D_2E_2F_1$  است. عملکرد بهینه با استفاده از آثار عمده‌ی فاکتورها برابر ۰/۰۴۷ به دست می‌آید.

۲. مشارکت نسبی متغیرها: مشابه بخش‌های قبلی، سهم نسبی هر فاکتور در جدول ANOVA محاسبه شده است (جدول ۱۱). در این تحلیل‌ها به علت بالا رفتن درجه‌ی آزادی بخش خطا، واریانس تغییرات خطا کاهش می‌یابد.

۳. تعیین دامنه‌ی اطمینان: دامنه‌ی اطمینان مربوط به طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و تکرار در هر موقعیت آزمایش به صورت رابطه‌ی ۱۷ محاسبه شده است:

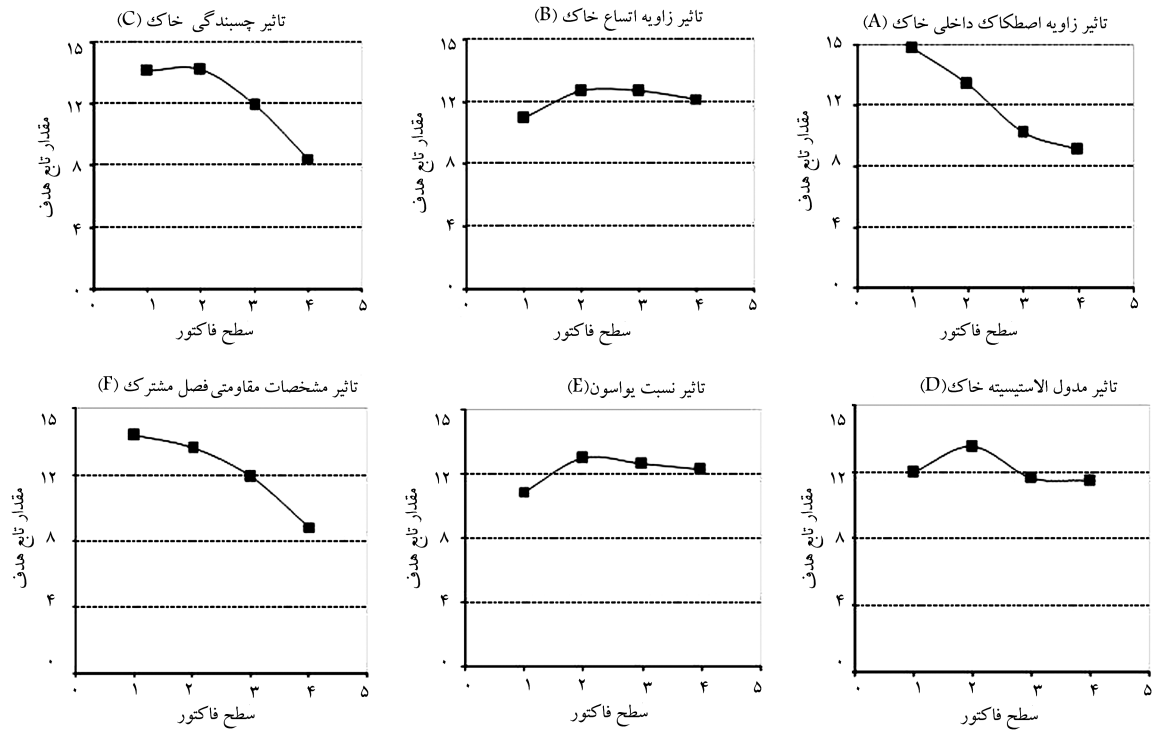
$$\alpha = 90\%, \quad n_e = 45, \quad N_e = 1769, \quad V_e = 0.0015, \\ C.I. = \pm 0.06 \quad (17)$$

جدول ۹. فاکتورهای مورد بررسی برای طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و تکرار (آزمایش اول).

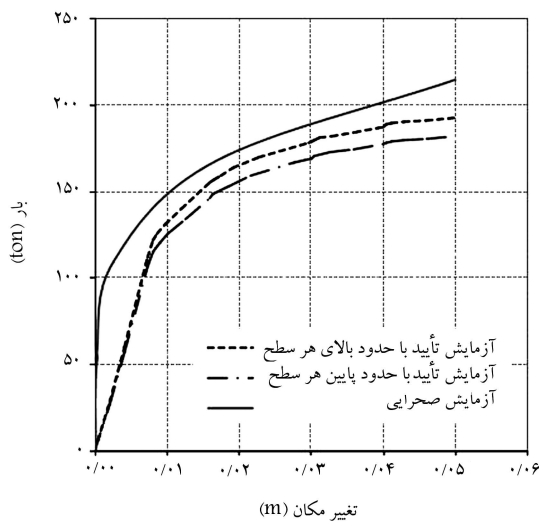
ردیف	فاکتور	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
۱	(A)	°	۱	۳	۵	۶
۲	(B)	°	۰	۰/۲۵	۰/۵	۱
۳	(C)	KPa	۲۹	۳۴	۳۹	۴۴
۴	(D)	MPa	۱۴	۱۷/۵	۲۱	۲۴
۵	(E)	-	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۴	۰/۴۴
۶	(F)	-	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱

جدول ۱۰. فاکتورهای مورد بررسی برای طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و تکرار (آزمایش دوم).

ردیف	فاکتور	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
۱	(A)	°	۱	۳	۵	۶
۲	(B)	°	۰	۰/۲۵	۰/۵	۱
۳	(C)	KPa	۲۷	۳۲	۳۷	۴۲
۴	(D)	MPa	۱۳	۱۶/۵	۲۰	۲۳
۵	(E)	-	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۳۹	۰/۴۲
۶	(F)	-	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱



شکل ۱۴. آثار عمده‌ی فاکتورهای اصلی در طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و ۲ بار تکرار (روش S/N).



شکل ۱۵. انجام آزمایش تأیید در شرایط بهینه در طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و ۲ تکرار.

ظرفیت باربری شمع براساس منحنی شکل ۱۶ از روش‌های مختلف تفسیر در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ و خلاصه‌ی نتایج روش‌های تفسیر در جدول ۱۳ ارائه شده است. بار نهایی شمع مطابق روش هانسن، باری است که در آن میزان تغییرمکان ۴ برابر تغییرمکان به ازای ۸٪ آن بار باشد. بر این اساس بار نهایی شمع برابر ۲۷۸ تن محاسبه می‌شود. مطابق روش چین، بار نهایی شمع برابر شیب بخش انتهایی نموداری است که محورهای آن مانند شکل ۱۸ است. بر این اساس بار نهایی شمع با تعیین مقادیر  $(\frac{\Delta}{P})$  برابر با ۱۶۳ میلی‌متر بر تن و  $\Delta$  برابر با ۰٫۵ متر در انتهای مرحله آزمایش، برابر با ۳۰۸ تن محاسبه می‌شود.

۲. تعیین دامنه‌ی اطمینان: دامنه‌ی اطمینان مربوط به طراحی آزمایش‌ها با ۴ سطح و تکرار که از تحلیل‌های واریانس S/N محاسبه شده است، به صورت رابطه‌ی ۱۸ است:

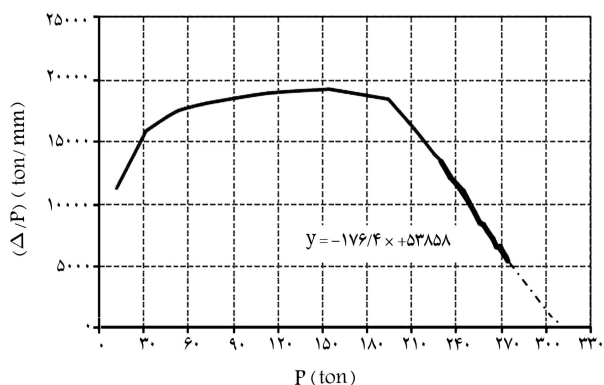
$$\alpha = 90\%, \quad n_e = 45, \quad N_e = 1768, \quad V_e = 1709, \quad C.I. = \pm 473 \quad (18)$$

با تبدیل مقدار به دست آمده به واحدهای اصلی مقدار دامنه‌ی اطمینان برابر ۴۰۰ است. پایین بودن مقدار دامنه‌ی اطمینان باعث می‌شود تا مقدار عملکرد بهینه‌ی به دست آمده از روش تاگوجی در محدوده‌ی کوچک‌تر و به صورت دقیق‌تر ارزیابی شود.

۳. آزمایش تأیید: به منظور تأیید نتایج، آزمایش تأیید در شرایط ترکیب  $A_1B_2C_2D_2E_2F_1$  انجام می‌شود. موقعیت آزمایش در این حالت شامل ۲ تکرار (آزمایش اول و دوم) است که نتایج آن در شکل ۱۵ ارائه شده است. در آزمایش تأیید، تکرار اول با حدود پایین در هر سطح (آزمایش اول)، با مقدار هدف ۰٫۱۰۲ انتخاب می‌شود.

## ۷. تعیین ظرفیت باربری شمع براساس پارامترهای تدقیق شده

پس از تدقیق پارامترهای خاک بر مبنای نتایج آزمایش بارگذاری بر روی شمع با قطر ۸ cm که با روش تحلیل سیستماتیک تاگوجی انجام شد، ظرفیت باربری برای شمع با قطر بیشتر (۱۲ cm) محاسبه شده است. منحنی بار-جابجایی برای شمع با قطر بیشتر با استفاده از روش مدل‌سازی عددی مطابق شکل ۱۶ است.



شکل ۱۹. تفسیر نتایج به روش دکورت برای شمع‌های با قطر ۱۲۰ cm.

جدول ۱۳. ظرفیت باربری شمع برای شمع با قطر ۱۲۰ cm.

روش	تفسیر	هانسن	دکورت	چین
ظرفیت باربری نهایی (Ton)	۲۷۸	۳۰۵	۳۰۸	

## ۸. نتیجه‌گیری

بر پایه‌ی تجزیه و تحلیل‌های سیستماتیک برای مدل‌سازی عددی آزمایش بارگذاری شمع، این موارد را می‌توان نتیجه گرفت:

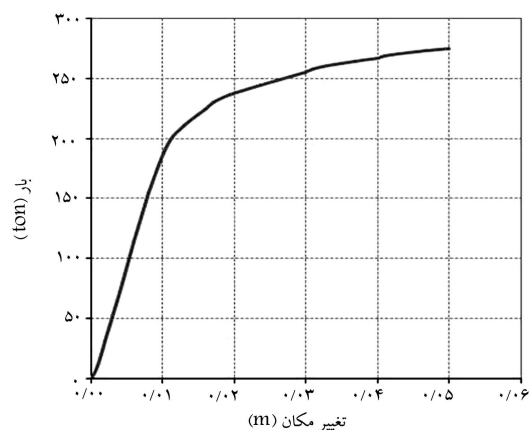
-- در تحلیل‌های فاکتورهای ۲ سطحی، سطح عدم وجود المان فصل مشترک تأثیر عمده بر روی نتایج پیش‌بینی‌شده‌ی روش تاگوچی دارد. در نظر گرفتن چنین سطحی برای فاکتور فصل مشترک باعث عدم پیش‌بینی درست برای مقادیر دقیق‌تر فاکتورهاست.

-- بر اساس تحلیل‌های ۲ سطحی، تداخل فاکتورهای چسبندگی و اصطکاک داخلی خاک با عامل مقاومتی فصل مشترک بیش از بقیه‌ی فاکتورهاست. همچنین فاکتورهای چسبندگی، اصطکاک داخلی و عامل مقاومتی فصل مشترک دارای بیشترین مشارکت نسبی و نسبت پواسون و زاویه‌ی اتساع کمترین اهمیت را دارد. بنابراین می‌توان اثر فاکتورهای کم‌اهمیت را نادیده گرفت.

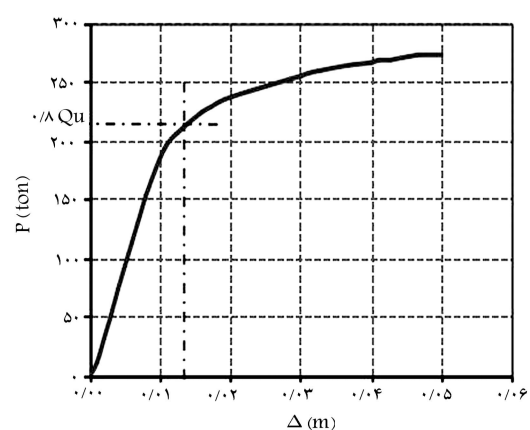
-- بر پایه‌ی تحلیل‌های انجام‌شده برای فاکتورهای ۲ سطحی و فاکتورهای ۴ سطحی توصیه می‌شود در صورت امکان تحلیل‌های با سطوح بیشتر به منظور بررسی آثار غیرخطی فاکتورها در ضمن طراحی آزمایش‌ها انجام شود.

-- در تحلیل‌های ۴ با سطح هم‌زمان با تدقیق پارامترهای تعیین‌شده و برآورد مقدار تابع هدف، می‌توان با در نظر گرفتن تکرار در محدوده‌ی هر سطح، تأثیر تغییرات را نیز در نظر گرفت و با کاهش واریانس خطا، بازه‌ی کوچک‌تری را برای دامنه‌ی اطمینان نتایج و در نتیجه افزایش دقت محاسبات، انتظار داشت. در تحقیق انجام‌شده، اختلاف تابع هدف پیش‌بینی‌شده‌ی روش تاگوچی و انجام آزمایش تأیید حدود ۳٪ است که با توجه به دامنه‌ی اطمینان محاسبه‌شده (۴٪  $C.I. =$ ) مورد قبول است.

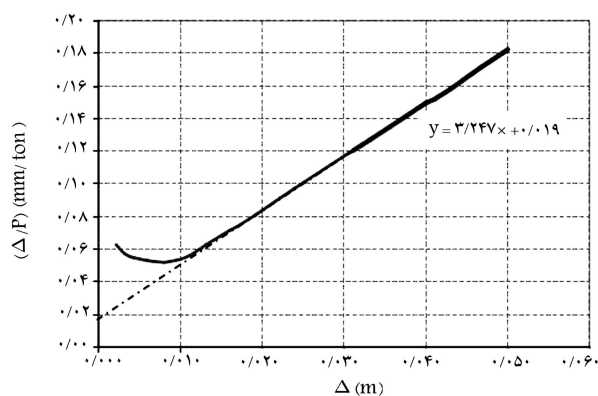
نتایج ارائه‌شده در تحقیق حاضر بیان‌گر این مطلب است که عملاً می‌توان با انجام تعداد کمتری آزمایش‌های صحرایی و استفاده از روش‌های عددی در قالب تحلیل‌های سیستماتیک، ظرفیت باربری را برای شمع‌های با قطر بیشتر در شرایط مشابه تعیین کرد.



شکل ۱۶. منحنی بار-جابجایی برای شمع با قطر ۱۲۰ cm.



شکل ۱۷. تفسیر نتایج به روش هانسن برای شمع‌های با قطر ۱۲۰ cm.



شکل ۱۸. تفسیر نتایج به روش چین برای شمع‌های با قطر ۱۲۰ cm.

همچنین مطابق روش دکورت بار نهایی شمع برابر نقطه‌ی تلاقی امتداد بخش انتهایی نموداری است که محورهای آن مانند شکل ۱۹ است. بر این اساس بار نهایی شمع در مقادیر  $\Delta$  بی‌نهایت ( $\frac{P}{\Delta} = 0$ ) برابر با ۳۰۵ تن محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه روش هانسن برای تعیین ظرفیت باربری نهایی شمع‌های کوبشی معرفی شده است، استفاده از آن برای شمع‌های درجاریز محافظه‌کارانه است. لذا پیشنهاد مؤلفان این نوشتار، در نظر گرفتن میانگین دو روش دکورت و چین به منزله‌ی ظرفیت باربری نهایی شمع است. به همین دلیل، ظرفیت باربری نهایی شمع با قطر ۱۲۰ cm برابر ۳۰۶/۵ تن تعیین می‌شود.

## پانوشتها

1. Taguchi
2. partial factorial experiments
3. analysis of variance (ANOVA)
4. degrees of freedom
5. percent contribution
6. confidence interval
7. elastic model
8. jointed rock model
9. Mohr- Coulomb model
10. soft soil model
11. hardening soil model
12. soft soil creep model

## منابع (References)

1. Fakharian, K., *Axial Bearing Capacity of Piles*, Iran, Transportation Research Institute, (In Persian) (1382).
2. Broere, W. and Van Tol, A.F., *Numerical Investigation Into Stress and Stain Development Around a Displacement Pile in Sand*, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands (2004).
3. Johnson, K.; Lemcke, P.; Karunasena, W. and Sivakugan, N., *Modelling the Load-Deformation Response of Deep Foundations Under Oblique Loading*, School of Engineering, James Cook University, Townsville, Queensland, 4811, Australia (September 2005).
4. Fellenius, B.H., *What Capacity Value to Choose from the Results a Static Loading Test*, Deep Foundation Institute, Fulcrum, pp. 19-22 (2001).
5. Roy, R.K., *A Primer on the Taguchi Method*, United States of America, New York (1990).
6. Chaulia, P.K. and Das, R. "Process parameter optimization for fly ash brick by Taguchi method", Central Mechanical Engineering Research Institute, Durgapur-713209, India (Jun 2008).
7. Tan, O. and Zaimoglu, A.S., *Taguchi Approach for Optimization of the Bleeding on Cement-Based Grouts*, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Ataturk University, Turkey (October 2004).
8. Turkmen, I. and Celik, G., *A Taguchi Approach for Investigation of Some Physical Properties of Concrete Produced from Mineral Admixtures*, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Ataturk University, Turkey (February 2007).
9. Oztas, A., *Investigation Mix Proportion of High Strength Self Compacting Concrete by Using Taguchi Method*, University of Gaziantep, Department of Civil Engineering, Turkey (April 2008).
10. Tortum, A., *Determination of the Optimum Conditions for Tire Rubber in Asphalt Concrete*, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Ataturk University, Turkey (November 2004).
11. Khoei, A.R., *Design Optimization of Aluminium Recycling Processes Using Taguchi Technique*, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (May 2002).
12. Elmi, F. "Systematic sensitivity analysis, application in CPT test modelling", Seventh Congress of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Iran, (In Persian) (1385).
13. Rowe, R.K. "Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook", Edition 2, Illustrated Published by Springer (2001).
14. User's Manual of Plaxis Version 8.20; Edited by Brinkgreve, R.B.J., Delft University of Technology, Netherlands (2002).
15. Karthigeyan, S., *Influence of Vertical Load on the Lateral Response of Piles in Sand*, Department of Civil Engineering, Geotechnical Engineering Division, Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600 036, India (May 2006).
16. Mora, L.I., "Load testing on piles from a coastal foundation", Mexico (2007).



# مدل‌سازی اثر ساخت سد خاکی بر روی مقاومت پی آبرفتی در برابر روانگرایی

رضا مهین‌روستا\* (استادیار)  
دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس  
رضا تقی‌نو (کارشناس ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه زنجان

مهندسی عمران: شریف  
دوره‌ی ۲-۱۳۸۰، شماره‌ی ۳، ص. ۶۳-۵۳

سازه‌های ژئوتکنیکی چنانچه بر روی مصالح آبرفتی مستعد روانگرایی احداث شوند، مقاومت در برابر روانگرایی پی بعد از ساخت سازه تغییر می‌کند؛ این مسئله به علت تغییرکردن بارهای لرزه‌یی وارد بر پی آبرفتی، میزان سربار وارده و تراکم مصالح در آبرفت پس از ساخت سد است. در این نوشتار، روشی جدید برای محاسبه‌ی تغییر تراکم مصالح پی آبرفتی پس از ساخت سد ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان با محاسبه‌ی مقاومت در برابر روانگرایی در پی و مقایسه‌ی آن با تنش‌های برشی حاصل از زلزله، ضریب اطمینان در برابر روانگرایی را محاسبه کرد. برای مقایسه، سه نوع بافت تراکمی ضعیف، متوسط و قوی در آبرفت ارائه شده و ضریب اطمینان در برابر روانگرایی، قبل و پس از ساخت سد مقایسه شده است.

واژگان کلیدی: روانگرایی، اثر سربار، سد خاکی، چگالی نسبی، عدد نفوذ استاندارد.

reza.mahinroosta@gmail.com  
rezaradesh62@gmail.com

## ۱. مقدمه

روانگرایی پدیده‌ی است که طی آن، مقاومت خاک ماسه‌یی در طول زلزله به دلیل افزایش فشار آب حفره‌یی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است و یا از بین می‌رود. این پدیده بیشتر در خاک‌ها و رسوبات سست اشماعی که در معرض بارهای دینامیکی قرار می‌گیرند، روی می‌دهد. در صورت وقوع روانگرایی خسارات متعددی به‌وقوع می‌پیوندد که به‌طور خلاصه می‌توان به فرونشست‌های زیاد، نشست‌های نامتقارن، و ناپایداری شیروانی‌ها اشاره کرد.

سدهای خاکی که به‌صورت هیدرولیکی ساخته شده‌اند و یا آن‌ها که بر روی پی‌های ضعیف ماسه‌یی قرار دارند، ممکن است در هنگام زلزله گسیخته شوند و فجایع جبران‌ناپذیری را به‌وجود آورند. سدهای خاکی مختلفی در دنیا وجود دارند که به‌دلیل وقوع روانگرایی در بدنه و یا پی، گسیختگی‌های عمده‌یی در آن‌ها به‌وجود آمده است. از جمله‌ی این سدها می‌توان به این موارد اشاره کرد:

-- وقوع روانگرایی در پی و بدنه‌ی سد شفیلد<sup>۱</sup> به ارتفاع ۷٫۶ متر در زلزله‌ی کالیفرنیا (۱۹۲۵)؛<sup>[۱]</sup>

-- روانگرایی و گسیختگی کلی سد باطله Barahona به ارتفاع ۶۵ متر در زلزله‌ی شیلی (۱۹۲۸) که موجب مرگ ۵۴ نفر شد؛<sup>[۲]</sup>

-- سد سن‌فرناندو<sup>۲</sup> پایینی به ارتفاع ۴۳ متر که در زلزله‌ی ۱۹۷۱ دچار آسیب‌های

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۵/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۰/۳/۲۹، پذیرش ۱۳۹۰/۴/۱۸.

عمده‌یی شد.<sup>[۳]</sup> به‌طوری که پس از وقوع زلزله مصالح روان تا حدود ۶۱ متر پایین‌تر از پنجه‌ی سد حرکت کردند و شیب بالادست تا ۱۵ متر نشست کرد؛

-- روانگرایی در بستر بالادست سد کارسینگتون<sup>۳</sup> به ارتفاع حدود ۳۰ متر در انگلیس (۱۹۸۴) که منجر به ناپایداری در پوسته‌ی بالادست شد؛<sup>[۴]</sup>

-- روانگرایی در مصالح سُست پی آبرفتی سدهای خاکی مختلف از جمله سد شیولاکا<sup>۴</sup> در هندوستان با ارتفاع ۱۸ متر که در زلزله‌ی سال ۲۰۰۱ منجر به نشست تاج سد تا ۲ متر شد.<sup>[۵]</sup>

با توجه به این خرابی‌ها، قطعاً لازم است روانگرایی پی‌های آبرفتی در سدهای خاکی قبل از ساخت سد ارزیابی شود. این ارزیابی‌ها به دو صورت می‌تواند انجام شود: روش اول، روش مرسوم در پروژه‌های سدسازی است که در آن پی آبرفتی بدون اثر سربار سد بررسی شده است و تمهیدات لازم برای بهبود وضعیت پی انجام می‌شود. در حالت دوم که هدف مطالعات تحقیق حاضر است، ارزیابی روانگرایی در پی آبرفتی بعد از ساخت سد صورت می‌گیرد؛ در این صورت می‌توان از تراکم پی آبرفتی حاصل از احداث سد استفاده کرد و با توجه به بهبود نسبی وضعیت پی در جهت اقتصادی بودن طرح عمل کرد.

از عوامل اصلی مؤثر بر روانگرایی خاک‌ها، میزان تراکم و شرایط تنش در آن‌هاست، لذا لازم است تا اثر تغییر تراکم مصالح و شرایط تنش حاصل از سربارهایی مانند یک سد خاکی بررسی شود. محققان مختلفی اثر ساخت سازه بر روی روانگرایی پی آبرفتی را بررسی کرده‌اند. مثلاً با انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ بر روی مدل یک