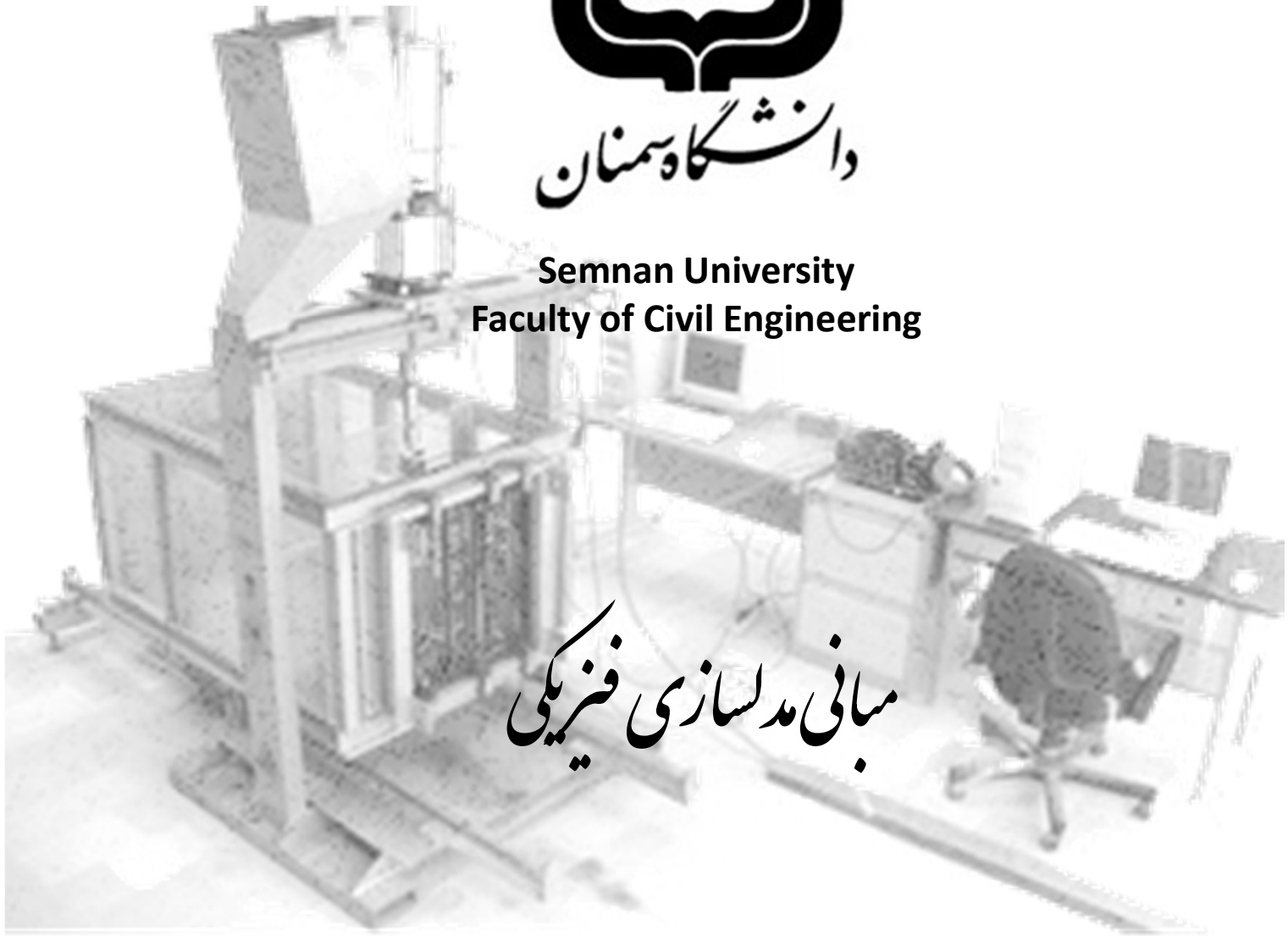
دانشگاه سمنان

Semnan University
Faculty of Civil Engineering



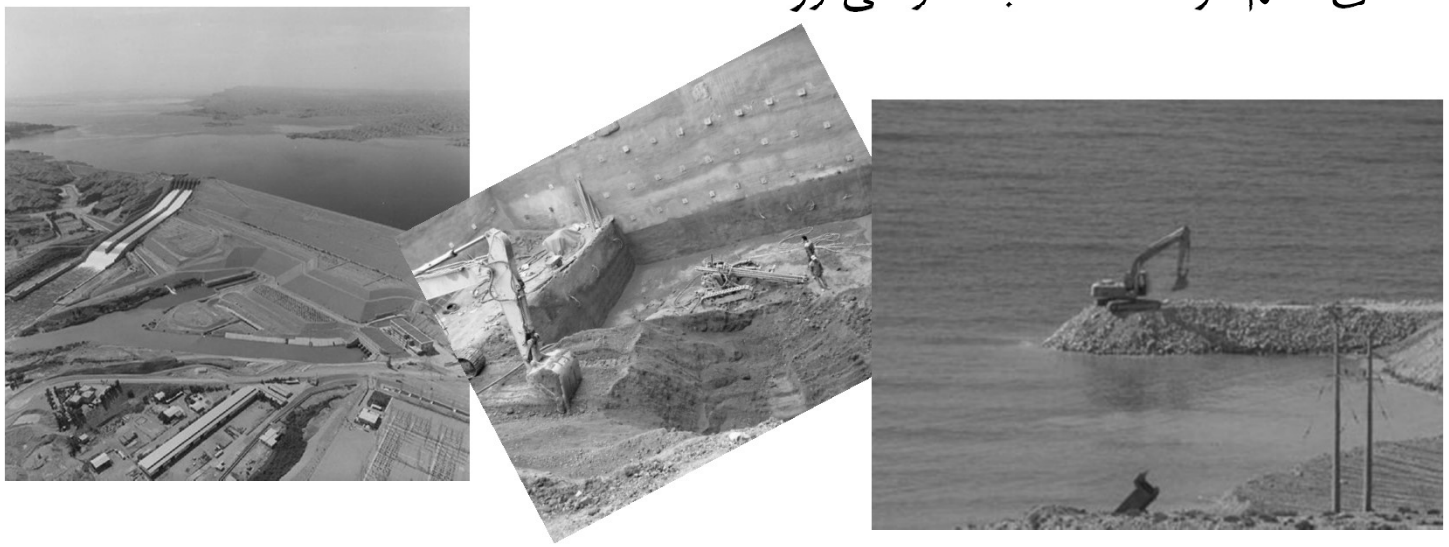
مبانی مدلسازی فیزیکی

ژئوتکنیک چیست؟

- ✓ ژئوتکنیک شاخه ای از مهندسی و شامل بکارگیری علوم مختلف و به ویژه مکانیک خاک و مکانیک سنگ و همچنین زمین شناسی مهندسی است.
- ✓ علوم مکانیک خاک و مکانیک سنگ، مربوط به مطالعه خواص مکانیکی خاک و سنگ و استفاده از آنها در کارهای مهندسی اند. بررسی تغییرشکل ناشی از کرنش خاک و یا سنگ در پاسخ به تنش های وارده بر آنها، در مکانیک خاک و سنگ انجام می شود. مکانیک خاک و سنگ هر دو اصول مکانیک مهندسی برای خاک و سنگ را به کار می گیرند، بنابراین آنها را می توان شاخه ای از علم مکانیک مهندسی قلمداد کرد. مکانیک مهندسی شاخه ای از علم فیزیک است، که پاسخ اجسام را تحت نیروهای وارده مطالعه می کند. بخش عمده مکانیک مهندسی بر پایه قوانین نیوتن استوار است.

ژئومکانیک شاخه ای از مکانیک مهندسی است و شامل دو بخش اصلی مکانیک خاک و مکانیک سنگ می شود.

- ✓ مکانیک خاک کاربردهای زیادی در طراحی و اجرای پی ساختمان ها، خاکریزها، ابنیه نگهبان خاک، زیراساس راه ها، عملیات خاکی، پی سد و نظایر آن دارد. مکانیک سنگ در طراحی و اجرای سازه های سنگی همچون شیروانی های سنگی، تونل ها، معادن، فضاهای زیرزمینی و چاهک های قائم در سنگ ها به کار می رود.



- ✓ مهندسی ژئوتکنیک از دیدگاه کاربردی، گسترده تر از ژئومکانیک است، زیرا ژئوتکنیک شاخه ای از مهندسی است که از علوم مختلف و به ویژه ژئومکانیک استفاده می کند. ژئومکانیک همانطور که قبل از این ذکر شد، شاخه ای از علم است، نه مهندسی و بطور کلی مهندسی شامل تحلیل، طراحی و ساخت برای اهداف کاربردی است.
- ✓ مهندس از تصور، قضاوت، منطق و تجربه استفاده می کند تا علوم فیزیکی، ریاضیات و فناوری را در عمل به کار گیرد. بنابراین مهندس ژئوتکنیک اگر چه علم ژئومکانیک را به کار می گیرد، اما وظایف گسترده تری دارد.
- ✓ برای مثال رعایت اقتصاد طرح، انجام قضاوت مهندسی، در نظر گرفتن ساخت پذیری طرح و نظایر آن از جمله وظایف مهندسی ژئوتکنیک بوده، ولی موضوع ژئومکانیک نیست.

اهداف این درس

- ✓ یکی از اهداف اصلی این درس را می توان بررسی مقایسه ای معایب و مزایای روش های مختلف تحقیق در ژئوتکنیک قلمداد کرد.
- ✓ اما لازمه انتخاب صحیح را می توان شناخت روش های مختلف تحقیق و اطلاع از محدودیت های آنها و همچنین توجه به محدودیت های زمانی و مالی تحقیق مورد نظر، ذکر کرد.

انواع روش ها و مسائل ژئوتکنیکی

مسائل ژئوتکنیکی با مطالعه یک جزء یا نمونه خاک و سنگ و همچنین با مطالعه کل توده یا سازه ژئوتکنیکی قابل حل اند. بنابراین مطالعات تحقیقی در ژئوتکنیک را از این دیدگاه می توان به دو دسته زیر تقسیم کرد:

الف) مطالعه نمونه خاک یا سنگ

ب) مطالعه کل توده یا سازه ژئوتکنیکی

- ✓ فرض کنید قصد مطالعه رفتار یک پی تحت بار را داریم، گاهی برای این مطالعه نمونه ای از خاک یا سنگ را در نظر می گیریم، که فرض می شود در زیر پی قرار دارد. آنگاه نمونه را در آزمایشگاه، تحت بارهای وارده در واقعیت قرار می دهیم. در مقابل این روش، گاهی کل سازه پی و خاک زیر آن را با یک مدل فیزیکی مطالعه می کنیم.

روش های مطالعه کل سازه ژئوتکنیکی

روش مطالعه	انواع
مدلسازی سازه ژئوتکنیکی	✓ مدل فیزیکی ✓ مدل عددی ✓ مدل تحلیلی ✓ مدل آمار و احتمالاتی
بررسی توده واقعی	✓ رفتار سنجی ✓ شناسایی محلی ✓ روش های زمین شناسی مهندسی

مطالعه نمونه خاک یا سنگ

نوع نمونه	روش های مطالعه	شرح
نمونه ساده	مطالعه آزمایشگاهی	✓ انتخاب نمونه یا جزء ✓ انتخاب یا ابداع دستگاه و روش آزمایش ✓ برنامه ریزی آزمایش ها ✓ نتیجه گیری و تفسیر
	مطالعه تحلیلی (ریاضی)	✓ توسعه مدل رفتاری
	مطالعه آماری	✓ بررسی داده های مربوط به نمونه ها
نمونه مرکب	✓ مشابه نمونه ساده، قابل بسط بوده، اما تاکنون توسعه زیادی نیافته است	

آمار و احتمالات در انواع روش ها و مسائل ژئوتکنیک کاربرد دارد. این کاربردها شامل موارد زیر است:

- ✓ تهیهٔ برنامه آزمایش ها و اندازه گیری ها
- ✓ تحلیل خطای اندازه گیری ها و جواب های حاصل از آزمایش ها
- ✓ ارتباط متغیرهای مختلف
- ✓ مدلسازی احتمالاتی یا آماری

مدلسازی آماری به عنوان یکی از روش های تحلیلی حل مسائل ژئوتکنیک نیز مطرح است.

برای مثال مطالعه ماسه بادی حاشیه دریای خزر به عنوان یک مطالعه ژئوتکنیکی در وسعت مکانی خیلی بزرگ قابل ذکر است. در این نوع مسائل باید از زمین شناسی هم کمک گرفت.

بررسی تجربی نمونه ها

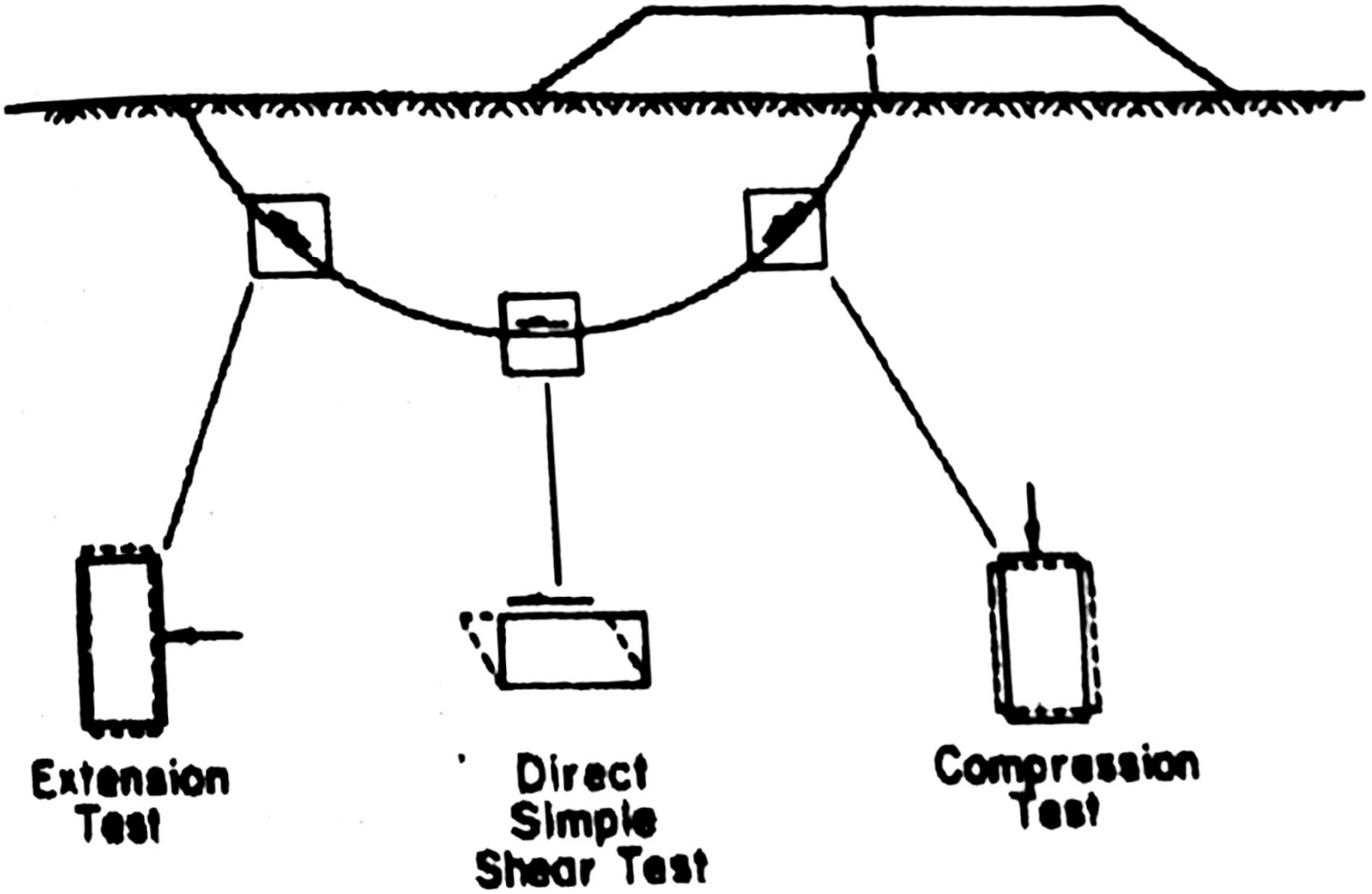
اغلب آزمون های آزمایشگاهی در مکانیک خاک و مکانیک سنگ، مثال های روشنی از بررسی های تجربی نمونه ها هستند. به طور معمول تلاش می شود که شرایط واقعی نمونه در توده خاکی، مثل تنش ها و فشار آب را در آزمایشگاه بازسازی کرده و آن ها را بر نمونه وارد کنند.

هر چه شرایط اولیه و شرایط مرزی نمونه در آزمایشگاه به شرایط واقعی نزدیک تر باشد، رفتار نمونه در آزمایشگاه، به رفتار واقعی نزدیک تر می شود.

برای مثال بیروم (Bjerrum, 1972) پیشنهاد کرد که نمونه های حاصل از نقاط مختلف خط گسیختگی در زیر یک خاکریز براساس شکل با آزمایش های مختلف برش یعنی سه محوری فشاری، برش ساده و سه محوری کششی آزمایش شوند.

از آنجا که شرایط یک نمونه واقع بر سطح گسیختگی یک شیروانی از بالا به پایین سطح گسیختگی فرق می کند، بیروم آزمایش های مختلفی را برای بررسی پیشنهاد کرد.

نمونه های مورد مطالعه ممکن است ساده یا مرکب باشند. نمونه مرکب از چندین نوع مصالح تشکیل می شود. نمونه خاک ماسه ای با یک لایه مسلح کننده را می توان به عنوان مثالی برای نمونه مرکب در نظر گرفت.


Extension
Test
Direct
Simple
Shear Test
Compression
Test

مراحل مطالعه نمونه ها

گام های مطالعه تجربی نمونه ها به عنوان یک روش تحقیق در جدول زیر نشان داده شده است.

گام	موضوع
اول	✓ انتخاب نمونه
دوم	✓ ابداع دستگاه یا روش مناسب برای اعمال شرایط محلی بر نمونه آزمایشگاهی
سوم	✓ برنامه ریزی آزمایش ها
چهارم	✓ انجام آزمایش ها و بررسی پاسخ ها
پنجم	✓ نتیجه گیری از آزمایش ها

ممکن است در یک تحقیق تمام این مراحل طی نشود، زیرا امکان دارد که یک تحقیق خاص در یک سلسله تحقیقات چنان برنامه ریزی شده باشد که فقط به یکی از مراحل مطالعه، نمونه محدود شود.

گام اول– انتخاب نظری نمونه مورد مطالعه

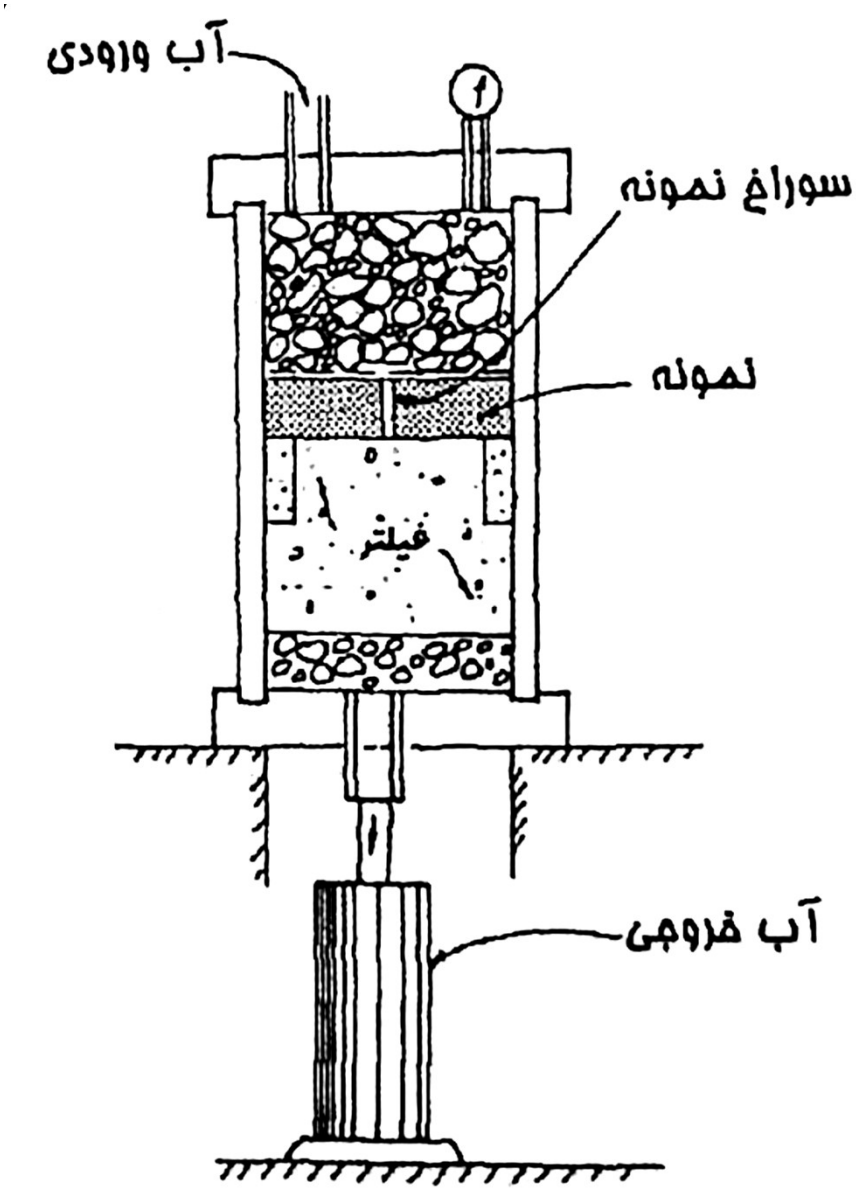
وقتی یک نمونه خاک و سنگ مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار می گیرد، فرض بر این است که این نمونه آزمایشگاهی و شرایط آن حین آزمایش، نشان دهنده شرایط واقعی آن نمونه در واقعیت است. انتخاب نظری نمونه از میان یک توده ژئوتکنیکی در واقع گام اولیه در یک مطالعه تجربی نمونه است.

برای مثال همانطور که در شکل قبل دیدیم، بیروم، نخست یک خط گسیختگی نظری را فرض می کند و سپس نمونه های مختلف روی این خط را به صورت نظری استخراج می کند.

استفاده گسترده از ابزار و روش های آزمایش بر نمونه های خاک و سنگ موجب می شود که گاهی به این مرحله از تحقیق توجه جدی نشود. در این صورت محقق نخواهد دانست که آزمایش مورد استفاده وی نشان دهنده کدام شرایط واقعی است.

در ادامه مثال های دیگری ذکر می شود.

آزمایش صافی (filter)



این آزمایش برای مطالعه صافی در سازه هایی همچون سدهای خاکی به کار می رود و هدف آن مطالعه قابلیت صافی مورد مطالعه برای جلوگیری از آب شستگی خاک مورد نظر است.

شکل طرح ساده دستگاه را نشان می دهد.

(Sherard & Dunnigan, 1989)

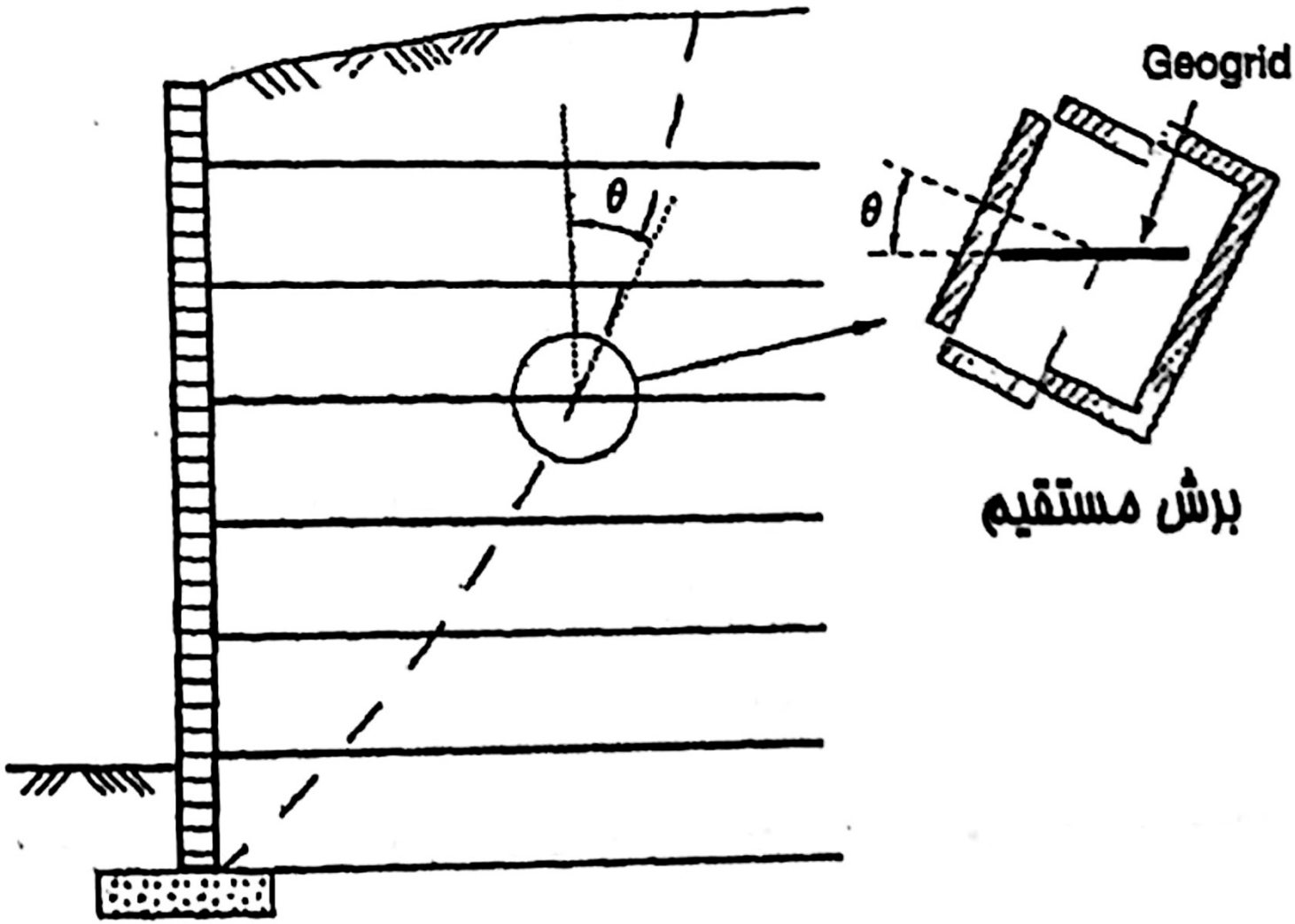
در این دستگاه آب از بالا و با فشار وارد می شود و پس از عبور از نمونه رس متراکم شده، از صافی عبور می کند. با ایجاد یک سوراخ کوچک در نمونه رس می توان قابلیت صافی را در جلوگیری از آب شستگی مطالعه کرد. در بالا و پایین نمونه در دستگاه، مقداری مصالح شنی می ریزند که هدف آن یکنواخت کردن جریان آب ورودی به نمونه و جلوگیری از اغتشاش در مسیر جریان آب است.

نمونه واقعی مورد مطالعه در آزمایش صافی، در واقع مجموعه نمونه رس و صافی مجاور آن است. یعنی نمونه مورد مطالع در اینجا در واقع یک نمونه مرکب است.

دیوار خاک مسلح

دیوار خاک مسلح با خاک دانه ای و مسلح کننده های افقی ساخته می شود. خاک دانه ای به صورت لایه لایه کوبیده می شود و سپس مسلح کننده ها (که ممکن است نوارهای فلزی یا مصالح پلیمری باشند)، به صورت افقی قرار می گیرند.

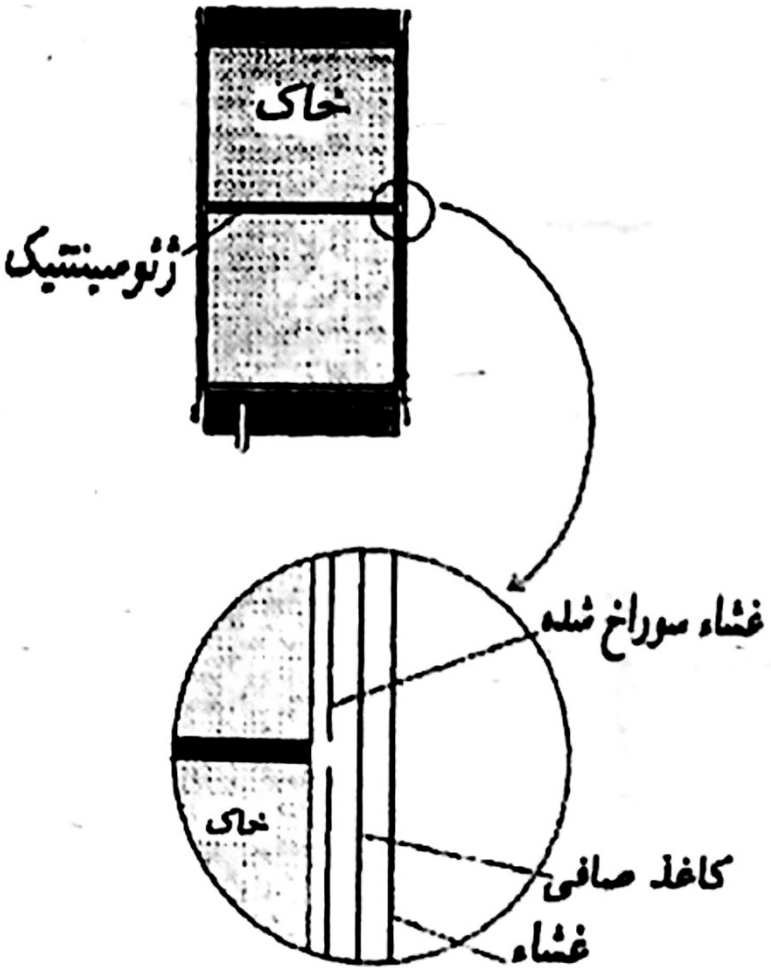
اگر ساز و کار گسیختگی دیوار خاک مسلح را به صورت لغزش یک گوه بر اساس شکل در نظر بگیریم، در محل تقاطع خط گسیختگی با هر یک از لایه های مسلح کننده افقی می توان نمونه ای را مورد توجه قرار داد که با دستگاه برش مستقیم قابل بازسازی است.


Geogrid
θ
θ
برش مستقيم

زاویه خط گسیختگی و مسلح کننده (θ) از بالا تا پایین خط گسیختگی فرق می کند. بنابراین در مطالعه نمونه در دستگاه برش مستقیم، باید در آزمایش های مستقل زوایای مختلفی برای θ به کار برد. با تغییر θ مطالعه نمونه های مختلف از بالا تا پایین خط گسیختگی انجام می شود.

این نوع تحقیقات بر نمونه های مرکب، موضوع کار چند پایان نامه دکتری در دانشگاه های مختلف از جمله دو پایان نامه شناخته شده در دانشگاه کمبریج (Jewell, 1980) و ساری انگلستان (Ingold, 1980) بوده است.

ترکیب تسلیح و زهکشی در ژئوسنتتیک

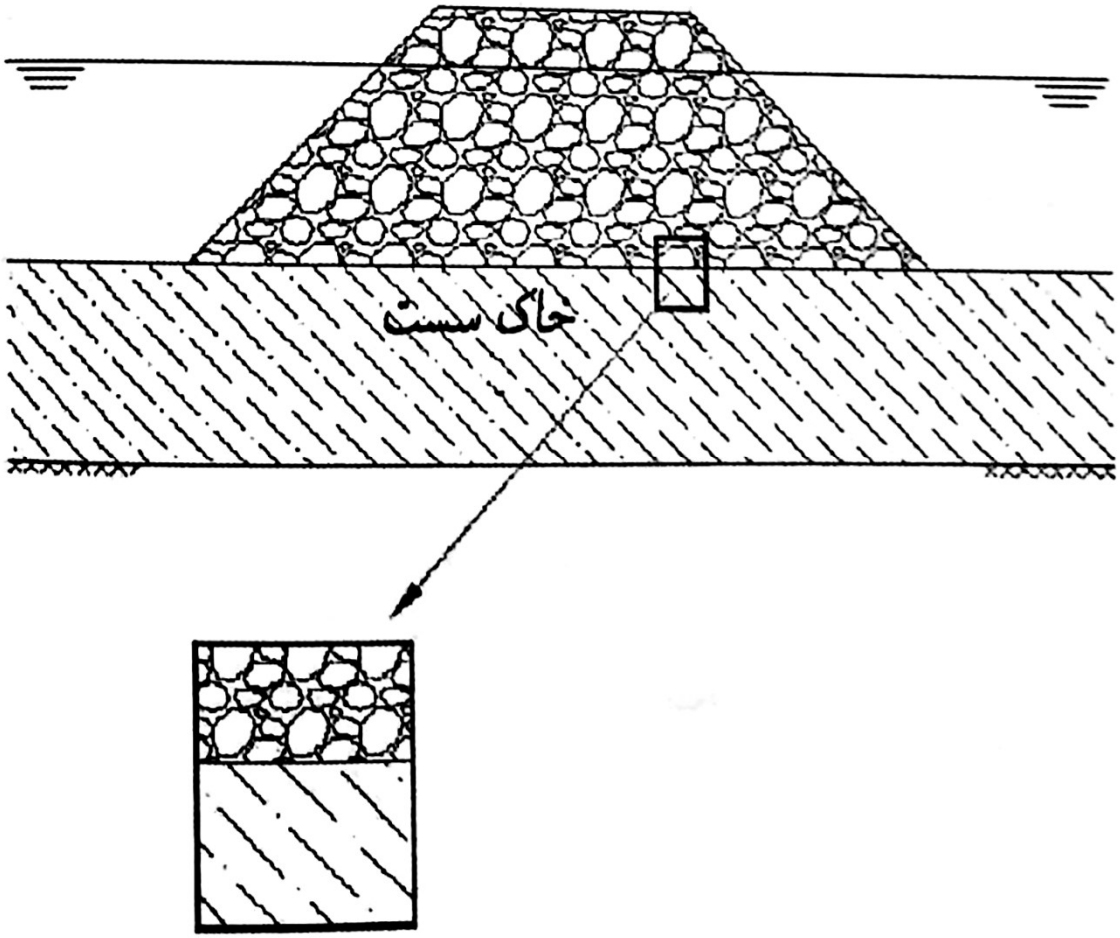


حشمتی (Heshmati, 1993) امکان ترکیب عملکرد مسلح کردن خاک ریزدانه با زهکشی آب حفره ای توسط ژئوسنتتیکها را در پایان نامه دکتری خود مورد مطالعه قرار داد. پرسش اصلی این بود که ژئوسنتتیک مناسب برای عملکردهای تسلیح و زهکشی در خاک ریزدانه به صورت توأم چیست؟

حشمتی این تحقیق را با استفاده از دستگاه آزمایش سه محوری برنامه ریزی کرد.

انواع ژئوسنتتیک در وسط نمونه خاک قرار داده شد و تاثیر آنها در تسلیح (افزایش مقاومت خاک) و در زهکشی (محو فشار اضافی آب حفره ای) مطالعه شد.

احداث خاکریزها بر بسترهای لجنی به ویژه موج شکن های سنگریزه ای در دریا، همواره می تواند مشکل آفرین باشد. اگر سنگدانه خیلی بزرگ باشند، به صورت تکی در لجن فرو می روند و ساز و کار ظرفیت باربری زمین تشکیل نمی شود. این نمونه در مرز سنگریز و بستر قرار دارد و می تواند عملکرد انفرادی سنگدانه ها را در فرورفت به درون خاک سست، نشان دهد. این تحقیق به کمک قالب و دستگاه بارگذاری نسبت باربری کالیفرنیا انجام و منجر به ارائه روشی برای محاسبه ضخامت مترس در زیر موج شکن ها شد.



گام دوم– ابزار و روش آزمایش

انتخاب دستگاه انجام آزمایش و روش کار، بسیار اهمیت دارد. بنابراین تحقیقات مختلفی در ژئوتکنیک فقط با هدف ابداع یک دستگاه و یا روش جدید آزمایش و یا ارزیابی روش ها و دستگاه های متداول صورت گرفته است.

انواع تحقیقات در زمینه ابزار و روش انجام آزمایش ها، در اینجا به دو دسته ارزیابی آزمایش های متداول و ابداع آزمایش جدید تقسیم می شود.

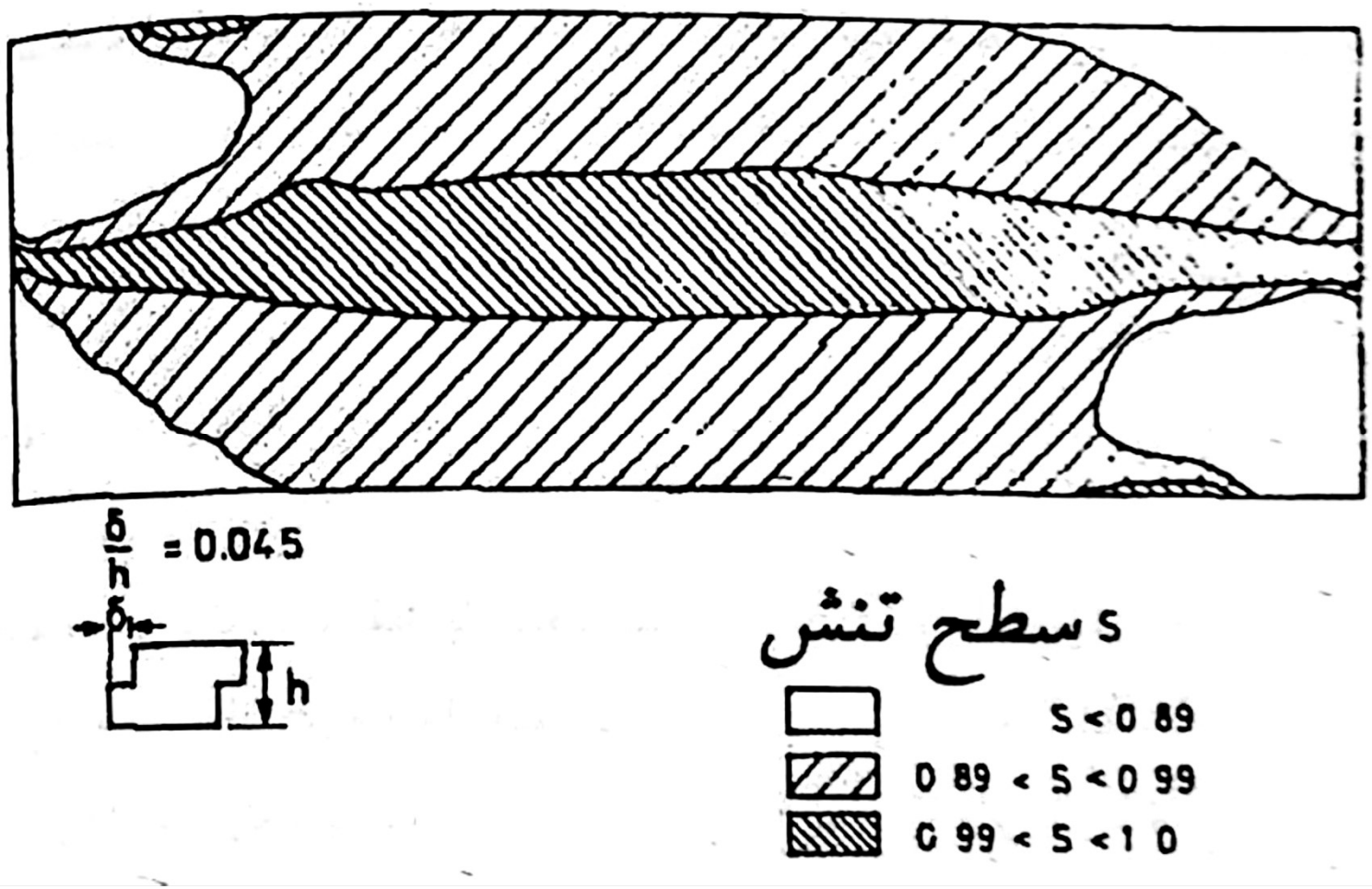
بررسی و ارزیابی آزمایش های متداول

تحقیقات مختلفی در خصوص ارزیابی و روش انجام آزمایش های متداول انجام می شود. زیرا همواره نگاه انتقادی در خصوص اغلب آزمایش های مرسوم وجود دارد.

با نگاه مثبت به اینگونه انتقادها می توان تحقیقات جدیدی را با هدف درک دقیق تر معایب آزمایش های متداول و روش های اصلاحی برای رفع این معایب، پایه گذاری کرد.

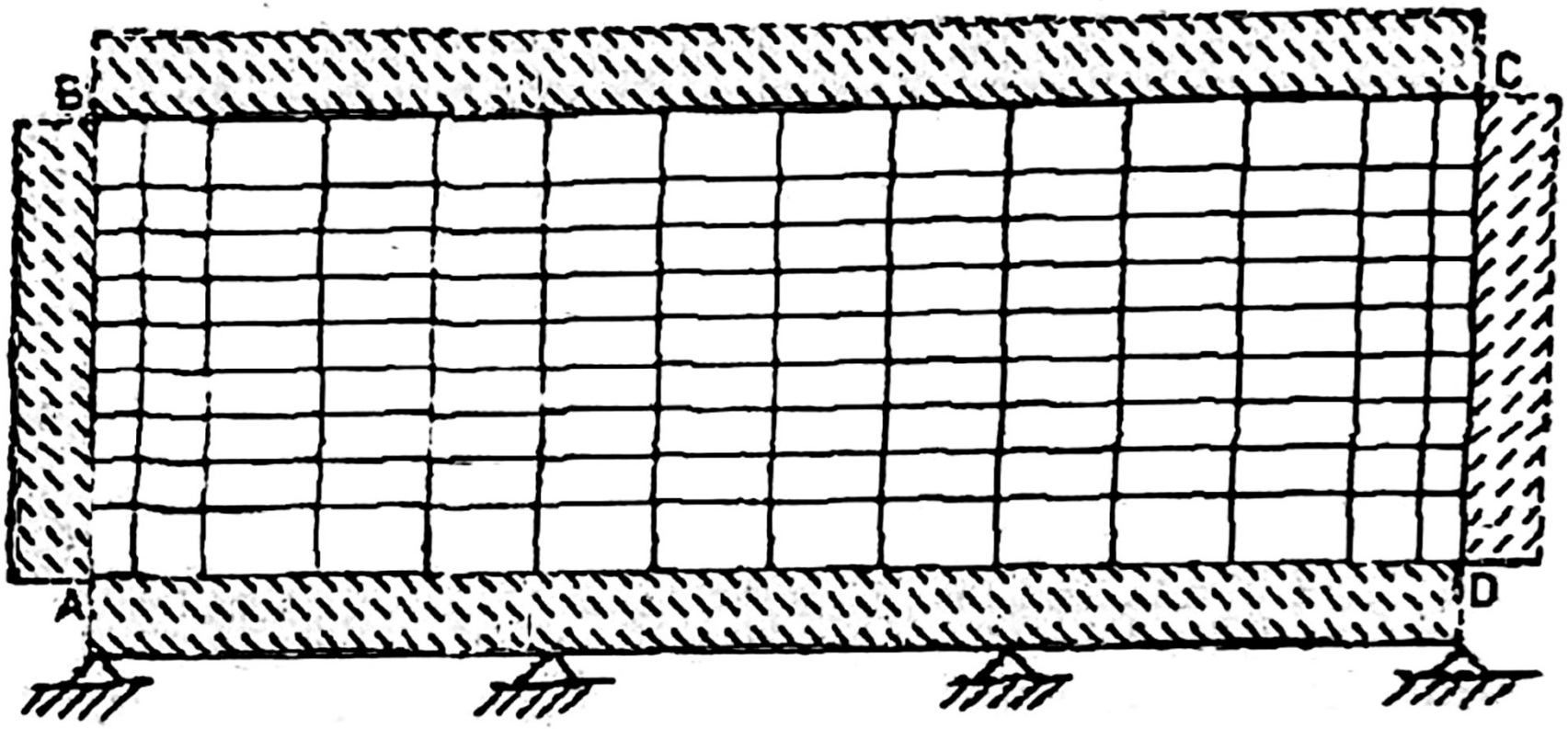
برای مثال تحقیقات دنباله داری در خصوص توزیع تنش و تغییرشکل در نمونه تحت آزمایش برش مستقیم و همچنین آزمایش برش ساده، صورت گرفته است. عدم یکنواختی توزیع تنش و تغییرشکل در آزمایش های برش مستقیم همواره گزارش شده است.

در شکل پاتس و دانشجویانش در دانشگاه امپریال کالج لندن، با مدل سازی عددی نشان دادند که فقط اگر مصالح همگن و رفتار آنها الاستو پلاستیک کامل باشد، مقاومت حداکثر خاک با وجود ناهمگنی تنش و کرنش، با دقت خوبی تعیین می شود.



آزمایش برش ساده با هدف رفع نواقص آزمایش برش مستقیم در نروژ و انگلستان ابداع شد. در کمبریج تعدادی پایان نامه دکتری با هدف بکارگیری و توسعه دستگاه آزمایش برش ساده در دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی انجام شد.

شکل زیر شبکه اجزا محدود مورد استفاده در مطالعه توزیع تنش و کرنش در آزمون برش ساده را نشان می دهد.



ابداع دستگاه و روش جدید آزمایش

گاهی کاستی روش های متداول آنقدر زیاد است که با آن ها نمی توان درباره موضوع مورد نظر تحقیق کرد، بنابراین باید دستگاه یا روش جدیدی برای آزمایش ابداع شود.

ابداع دستگاه های آزمایش در ژئوتکنیک اغلب با کارهای الکترونیکی و مکانیکی توام است. برخی تصور می کنند که ابداع این ابزار به دلیل جنبه های الکترونیکی و مکانیکی خارج از حوزه ژئوتکنیک است. اما باید توجه کرد که تمام ابزارهای آزمایش های ژئوتکنیکی را مهندسان ژئوتکنیک ابداع کرده اند.

تحقیقات مختلفی بر روی خاک و سنگ انجام شده است. تاریخچه ابداع برخی از آزمون ها مثل دستگاه آزمایش تحکیم خاک های نباتی، دستگاه آزمایش تحکیم سریع و دستگاه آزمایش مطالعه واگرایی را می توان در کتاب ارزشمند هد (Head, 1986) بیابید.

گام سوم– برنامه ریزی آزمایش ها

در هر تحقیق تجربی باید برنامه ای برای آزمایش ها یا اندازه گیری های طراحی کرد. این برنامه ریزی ها مختص مطالعات تجربی نمونه ها نیست و در آزمایش با مدل فیزیکی و حتی اندازه گیری های محلی کاربرد دارد.

مبانی علمی این کار در شاخه ای از آمار به نام طراحی آزمایش ها (design of experiments) آمده است.

این روش های آماری شامل قواعد و روابط ریاضی بسیاری هستند که برای آزمایش های زیاد و با متغیرهای گسترده، قابل استفاده اند، ولی در ژئوتکنیک اغلب تعداد آزمایش ها خیلی زیاد نیست.

متداولترین روش برنامه ریزی آزمایش ها در ژئوتکنیک روش فاکتوریل است.

روش فاکتوریل ساده

فرض کنید قصد مطالعه اثر رطوبت بر مقاومت برشی خاک دانه ای گرد گوشه در دستگاه برش مستقیم را داریم. همچنین فرض می کنیم متغیرهای موثر شامل سرعت برش (v)، سربار (P)، تراکم خاک (D) و رطوبت خاک (w) هستند. آنگاه محدوده ای را برای هر یک از متغیرها انتخاب کرده و براساس جدول زیر برنامه ریزی می کنیم.

متغیر	سرعت برش v	سربار P	تراکم D	رطوبت w
مقادیر انتخابی	v_1= خیلی کند v_2=کند v_3=تند v_4=خیلی تند	P_1=0 P_2=10 P_3=20 P_4=40 P_5=80 P_6=160	D_1=پایین D_2=متوسط D_3=بالا	w_1=0 w_2=2 w_3=4 w_4=8 w_5=اشباع
تعداد	۴	۶	۳	۵

در اولین آزمایش براساس جدول، مقدار رطوبت، تراکم، سربار و سرعت برش به ترتیب برابر با صفر، پایین، صفر و خیلی کند انتخاب و آزمایش انجام می شود. در آزمایش بعدی، تراکم، سربار و سرعت برش را ثابت نگه داشته و فقط رطوبت را از صفر تا اشباع تغییر می دهیم. اگر تمام متغیرها را به تعداد مقادیر ذکر شده در جدول تغیر دهیم، آنگاه تعداد آزمایش ها (N) چنین محاسبه می شود:

$$N = 5 \times 3 \times 6 \times 4 = 360$$

روش بالا برای طراحی برنامه و تعداد آزمایش ها را فاکتوریل ساده می گویند. تعداد آزمایش ها در این روش بسیار زیاد است.

روش متغیرهای محوری

در آمار روش های مختلفی پیشنهاد شده که تعداد آزمایش ها به روش منطقی کم شود. براساس مفاهیم کتاب های طراحی آزمایش ها به عنوان جایگزین روش فاکتوریل می توان یک سری متغیر محوری (core parameters) انتخاب کرد.

برای مثال انتخاب زیر را براساس متغیرهای جدول قبل بر می گزینیم.

v_3=تند و $P_4=40$ و D_2=متوسط و $w_4=8$

انتخاب متغیرهای محوری براساس اطلاعات حاصل از تحقیقات گذشته و قضاوت محقق صورت گرفته و ممکن است با پیشرفت تحقیق عوض شود. پس از انتخاب متغیرهای محوری، با ثابت نگه داشتن هر یک از آنها، اقدام به تغییر تنها یکی از متغیرها می کنیم. برای مثال به منظور مطالعه اثر تراکم می توان مطابق جدول زیر عمل کرد. سه آزمایش برای مطالعه اثر تراکم خاک لازم است.

متغیر	سرعت برش v	سربار P	تراکم D	رطوبت w
مقادیر انتخابی	v_3=تند	$P_4=40$	D_1=پایین D_2=متوسط D_3=بالا	$w_4=8$

۵ آزمایش نیز به منظور بررسی اثر رطوبت لازم است. اما از آنجا که یکی از این آزمایش ها بر روی متغیرهای محوری اندازه گیری شده، تعداد آزمایش ها برای مطالعه اثر رطوبت برابر ۴ خواهد بود.

براساس جدول، به ازای هر انتخاب برای یک سری متغیر محوری، نیاز به ۱۵ آزمایش داریم.

آزمایش	**تعداد**
متغیرهای محوری	۱
مطالعه اثر W	۱-۵
مطالعه اثرD	۱-۳
مطالعه اثرP	۱-۶
مطالعه اثر V	۱-۴
جمع	**۱۵**

از معایب این روش این است که امکان دارد تأثیر تداخل یا اندرکنش برخی از عوامل موثر در آن دیده نشود. برای مثال ممکن است اثر تراکم به ازای رطوبت صفر با تأثیر آن در رطوبت اشباع فرق کند. در این صورت می توان دو دسته متغیر محوری انتخاب کرد. در این حالت تعداد آزمایش ها در مثال ذکر شده حداکثر ۳۰ عدد خواهد شد که هنوز خیلی کمتر از ۳۶۰ آزمایش در روش فاکتوریل است.

علاوه بر به کارگیری روش بالا برای برنامه ریزی آزمایش ها، لازم است به نکته مهمی برای بهینه کردن تعداد آزمایش ها توجه شود و آن تحلیل همزمان نتایج با انجام آزمایش ها براساس برنامه اولیه است. هرگز تحلیل آزمایش ها را نباید به انتهای کار واگذاشت، زیرا انجام تحلیل اولیه همزمان با انجام آزمایش ها برای اصلاح برنامه آزمایش ها حین انجام کار ضروری است.

روش محدوده های ویژه

برای تشریح روش محدوده های ویژه، فرض کنید می خواهیم فشار قائم نمونه را برای ۳۰، ۶۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال در آزمایش های مختلف، تغییر دهیم. همچنین مکش ایجاد شده را از ۲۰ الی ۵۰۰ کیلوپاسکال تغییر دهیم.

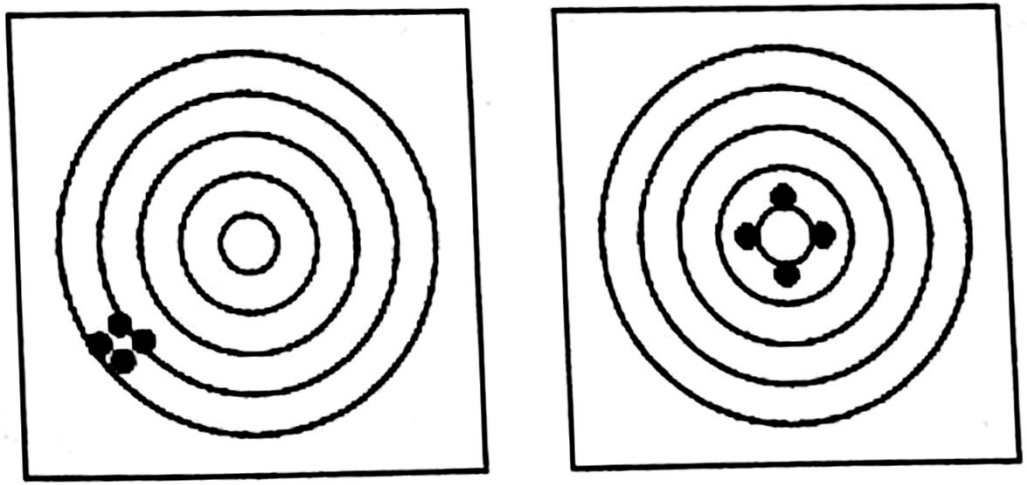
در اینجا می توانیم به ازای تنش قائم ۳۰ کیلوپاسکال مقدار مکش را برابر با ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلوپاسکال اعمال کنیم. یعنی ۳ آزمایش به ازای تنش قائم ۳۰ کیلوپاسکال انجام می دهیم و بطور مثال برای فشار قائم ۴۰۰ کیلوپاسکال مقدار مکش را برابر با ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ انتخاب می کنیم.

ملاحظه می شود برای محدوده مقادیر تنش ۳۰ کیلوپاسکال مکش بسیار کوچک و برای ۴۰۰ کیلوپاسکال مقادیر مکش بزرگ است.

ایده اصلی در روش محدوده های ویژه این است که با اعمال شروط و محدودیت های خاص بر محدوده آزاد تغییرات متغیرها، بتوانیم تعداد آزمایش ها را کاهش دهیم.

گام چهارم– انجام آزمایش ها و بررسی پاسخ ها

در این مرحله آزمایش ها به مرور انجام می شود. نتایج یا پاسخ های حاصل از هر آزمایش، باید قبل از هر نتیجه گیری علمی بررسی شود و پاسخ ها از دیدگاه دقت (precision) یا تکرارپذیری (repeatability) و همچنین صحت (accuracy) مطالعه شوند.



توجه کنید که مفاهیم دقت و صحت نتایج با یکدیگر فرق دارند. دقت و تکرارپذیری مترادف هستند لیکن دقت و صحت با هم تفاوت اساسی دارند.

در مقایسه نتایج پرتاب تیر به هدف، شکل راست دقت و تکرارپذیری پایین با صحت بالا و شکل چپ دقت و تکرارپذیری بالا با صحت پایین را نشان می دهد.

دقت و تکرارپذیری پاسخ ها

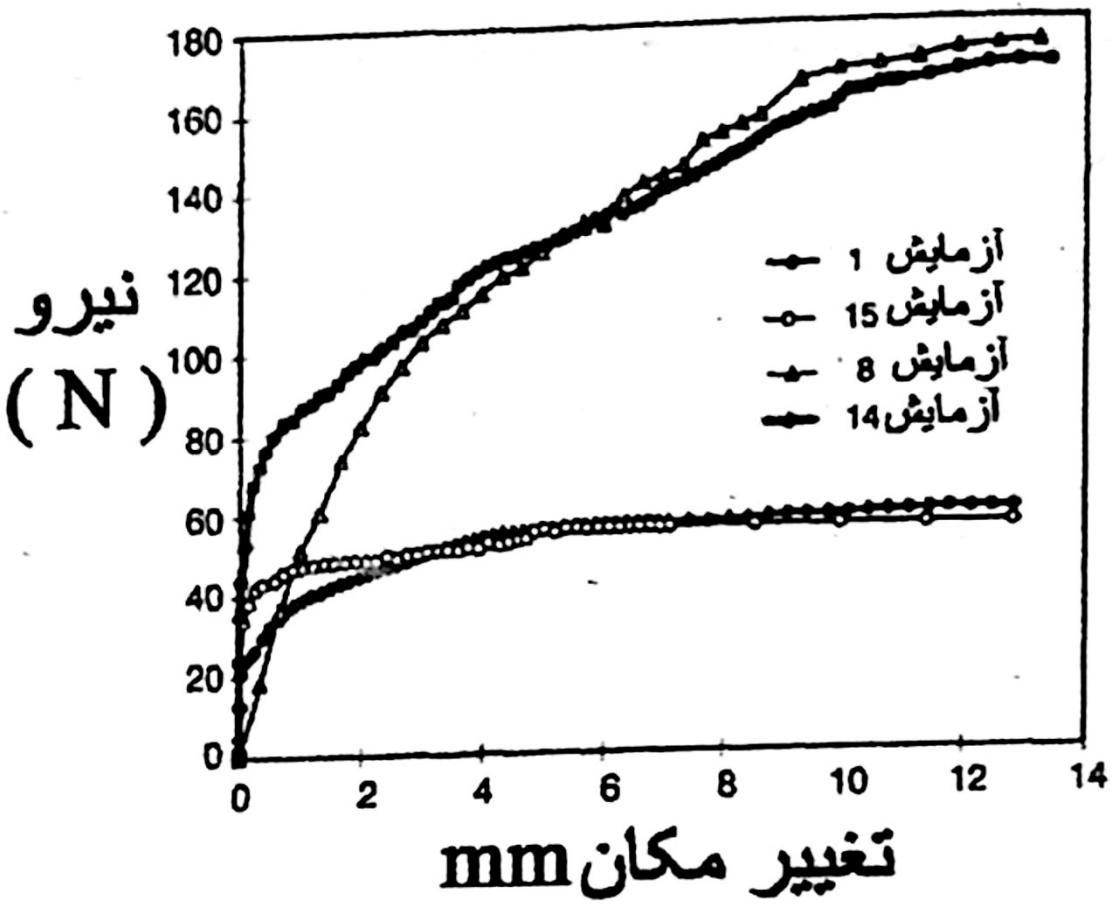
دقت و تکرارپذیری تفاوت کوچکی با هم دارند. دقت پاسخ های هر آزمایش به تکرارپذیری و همچنین حساسیت اندازه گیری بستگی دارد. جواب های حاصل از یک آزمایش باید تکرارپذیر باشند. یعنی اگر نمونه و شرایط دو آزمایش فرق نکند، جواب های حاصل از آنها باید مشابه حاصل شوند. حساسیت دستگاه اندازه گیری نسبت به متغیرهای ورودی باید متناسب با دقت مورد نیاز در مسئله باشد. به عنوان مثال نمی توان با یک ترازوی بزرگ معمولی تغییر تدریجی درصد رطوبت خاک تا ۱۰۰ گرم را قرائت کرد.

دقت و خطا عبارت های مهمی هستن که شناخت ارتباط آنها اهمیت دارد.

مفهوم	تعریف	عوامل
صحت	میزان انطباق با واقعیت	- کالیبره بودن ابزار اندازه گیری - کارکرد درست دستگاه ها و ابزار
دقت	میزان مشابه بودن نتایج اندازه گیری های یکسان	- تکرارپذیری (قابلیت انجام مجدد) - کوچکترین واحد اندازه گیری

تکرار یک یا چند آزمایش

گاهی یک منحنی از آزمایش بدست می آید و جواب آزمایش فقط یک عدد نیست. در اینجا نمی توان ضریب تغییرات را حساب کرد و باید منحنی ها را مثل شکل مقایسه کنیم.

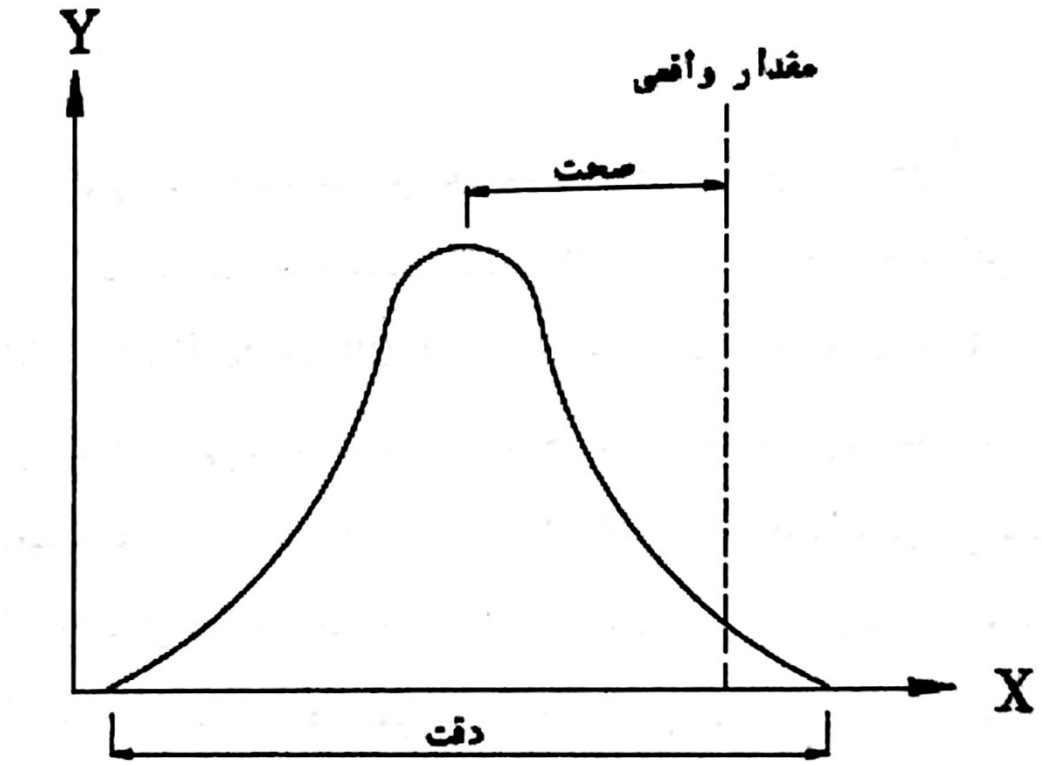


صحت پاسخ ها

فرض کنید که یک دستگاه یا روش جدید آزمایش برای مطالعه پدیده خاصی ابداع می شود، یکی از کارهای مهم در این تحقیق بررسی صحت جواب ها است.

ممکن است نتایج حاصل از یک آزمایش دقیق و تکرارپذیر باشند، اما به دلیل خرابی دستگاه ها صحیح نباشند.

شکل مفاهیم قبلی را به صورت دیگری نشان می دهد.



گاهی دستگاه یا آزمایش خاصی سال ها در ژئوتکنیک استفاده شده، ولی با این وجود، بررسی صحت جواب های آن دستگاه یا آزمایش به عنوان موضوع یک تحقیق جدید، انتخاب می شود.

بررسی صحت جواب های یک آزمایش، می تواند شامل موارد زیر باشد:

الف) بررسی تشابه شرایط نمونه آزمایشگاهی و واقعیت

ب) بررسی حساسیت آزمایش به تغییر متغیرهای مهم

ج) بررسی مقایسه ای جواب های آزمایش با سایر آزمایش ها

د) بررسی مقایسه ای با جواب های واقعی حاصل از تحلیل های برگشتی

الف) بررسی تشابه شرایط نمونه آزمایشگاهی و واقعیت

شرایط نمونه در آزمایشگاه را از نظر تنش ها و تغییر شکل های اعمال شده در مرزهای نمونه و همچنین مسیرهای اعمال تنش یا حتی توزیع رطوبت می توان مطالعه و با واقعیت مقایسه کرد. البته هرگز تشابه کاملی بین شرایط نمونه در آزمایشگاه و شرایط واقعی در محل وجود ندارد، بنابراین باید قضاوت مناسبی در مقایسه با سایر آزمایش ها و تحقیقات دیگر انجام داد.

برای مثال همانطور که پروفسور پاتس در تحقیقاتش ذکر کرد که دستگاه برش مستقیم در آزمایشگاه نمی تواند کرنش یکنواخت بر نمونه وارد کند. بنابراین شرایط نمونه آزمایشگاهی و واقعیت تفاوت زیادی دارد.

برای مثالی دیگر از عدم تشابه شرایط نمونه و واقعیت می توان ذکر کرد که گاهی نمونه اشباع نمی شود، ولی در واقعیت اشباع است، پس شرایط آن با واقعیت فرق می کند.

ب) بررسی حساسیت آزمایش به تغییر متغیرهای مهم

نتایج آزمایش باید نسبت به تغییر متغیرهای اصلی حساس باشد، اگر متغیرهای مهم را تغییر می دهیم، ولی جواب ها تغییر چندانی نمی کنند، مشکلی وجود دارد و نیازمند بررسی های بیشتر است.

برای مثال مقاومت برشی خاک های غیراشباع، تابع مکش خاک است. اگر جواب های دستگاه تحقیقی خاصی که برای مطالعه اثر مکش بر مقاومت برشی ساخته ایم، نسبت به تغییر مکش حساس نباشد، مشکلی وجود دارد.

ج) بررسی مقایسه ای جواب های آزمایش با سایر آزمایش ها

مقایسه نتایج آزمایش های مختلف برای بررسی صحت پاسخ ها بسیار متداول است. البته جواب های حاصل از آزمایش ها به دلیل تفاوت در شرایط نمونه و مسیر اعمال تنش و تغییر شکل، با هم فرق دارد. برای مثال هرگز نباید انتظار داشت که مقاومت برشی رس اشباع از آزمایش سه محوری و برش پره محلی یکسان باشد، ولی مقایسه نسبی با قضاوت مقدور است.

حذف داده های غیر عادی می تواند در اینجا یا هر مرحله ای از بررسی صحت جواب ها انجام شود. به بیان ساده می توان جواب های هر آزمایش را با یکدیگر هم مقایسه کرد و هم جواب های نادرست را تشخیص داد.

د) بررسی مقایسه ای با جوابهای واقعی حاصل از تحلیل های برگشتی

با تحلیل برگشتی سازه های واقعی می توان متغیرهای زمین را تعیین و با جواب های حاصل از آزمایش مقایسه کرد.

فرض کنید می خواهیم مقاومت برشی خاک دانه ای را با استفاده از تحلیل برگشتی گسیختگی زمین زیر یک پی سطحی، به دست آوریم. بار را آنقدر زیاد می کنیم تا پی گسیخته و ظرفیت باربری نهایی پی معلوم شود. سپس زاویه اصطکاک خاک چنان تعیین می شود که همان مقدار ظرفیت باربری نهایی با استفاده از روابط متداول ظرفیت باربری به دست آید. زاویه اصطکاک حاصل از این روش علاوه بر خطاهای مربوط به اندازه گیری بار، دارای خطاهای ناشی از تعیین ظرفیت باربری نهایی از منحنی بار در مقابل تغییرمکان و همچنین خطاهای نظری و فرضیات ساده کننده در روابط کلاسیک ظرفیت باربری نهایی است.

گام پنجم– نتیجه گیری ژئوتکنیکی از آزمایش ها

پس از اینکه تکرارپذیری و صحت جواب های آزمایش روشن شد، آنگاه برنامه مناسبی برای آزمایش ها طرح و آزمایش ها انجام خواهند شد. نتیجه گیری از آزمایش ها یکی از مهمترین مراحل تحقیق محسوب می شود و با توجه به موضوع و روش تحقیق دارای جزئیات گوناگون است.

نکات عمومی ذکر شده در این بخش در مورد نحوه نتیجه گیری از آزمایش ها، مختص تحقیق با روش مطالعه نمونه ها نیست و در سایر روش های تحقیق نیز قابل استفاده خواهد بود.

انتخاب محورهای مناسب

به طور معمول منحنی تغییرات متغیرهای مورد مطالعه نسبت به یکدیگر در محور مختصات x، y و z ترسیم می شود. محورها اغلب حسابی، لگاریتمی یا معکوس اند. انتخاب مناسب نوع محورها می تواند موجب تسهیل در نتیجه گیری شود.

محورهای لگاریتمی مزیت زیادی در نشان دادن برخی از پدیده ها دارد. اگر اهمیت تغییرات یک متغیر در طول محدوده تغییرات آن فرق کند، از محورهای لگاریتمی استفاده می کنیم. برای مثال نشست زمین بلافاصله پس از بارگذاری زیاد است، ولی سرعت نشست به مرور زمان کم می شود. بنابراین اهمیت تغییرات نشست در زمان های کوتاه پس از بارگذاری، بیشتر از اهمیت آن در زمان های طولانی است. در اینجا بهتر است زمان را در محور لگاریتمی رسم کنیم.

منحنی دانه بندی خاک هم مثال مشابه از ضرورت به کارگیری محور با مقیاس لگاریتمی است.

زیرا دانه های کوچک بیش از دانه های بزرگ تغییرات جزیی و در عین حال مهم دارند. برای مثال خواص رس و لای خیلی با هم فرق دارند، اما خواص دانه های با قطر ۳۰ و ۴۰ میلیمتر فرق زیادی با هم ندارند.

به کارگیری متغیرهای بی بعد

گاهی متغیرهای بی بعد یا نرمالیزه بسیار گویاتر از متغیرهای معمولی اند و لازم است نتیجه گیری از آزمایش ها براساس آنها انجام شود. بهتر است متغیر بی بعد انتخاب شده برای تحلیل نتایج، دارای مفهوم فیزیکی روشنی باشد.

مثال هایی از متغیرهای بی بعد یا نرمالیزه که در تحقیقات ژئوتکنیکی به کار می روند، ذکر می شود.

- وقتی در آزمایش برش مستقیم، تنش برشی (T) به ازای تنش قائم (σ) در مقابل تغییر مکان افقی (Δ) جعبه برش ترسیم می شود. مقادیر T به ازای مقادیر بزرگ σ خیلی زیاد می شود و گاهی ترسیم منحنی های مربوط به تنش قائم متفاوت، در محورهای مختصات مشترک مقدور نیست. در اینجا متغیر بدون بعد T/σ گویاتر از T است و کار کردن با آن برای ترسیم نتایج ساده تر خواهد بود.
- در مطالعه ظرفیت باربری پی های سطحی (q) با مدل های فیزیکی در خاک های چسبنده با مقاومت برشی (C) از پی های کوچک به عرض B استفاده می شود. آزمایش ها بر خاک هایی با مقادیر مختلف C و پی هایی با عرض های گوناگون B انجام می شود.

- در این نوع مطالعات اغلب $q/B.C$ یا ترکیب دیگری از متغیرها، به مراتب گویاتر از q است، و مطالعه تغییرات آن در شرایط مختلف اهمیت بیشتری دارد. البته $q/B.C$ بدون بعد نیست و در واقع نوعی ظرفیت باربری نرمالیزه نسبت به عرض و چسبندگی خاک است.
- در مطالعه پایداری شیروانی خاکی به ارتفاع H در خاک های چسبنده با مقاومت برشی C اغلب از $\gamma H/C$ برای تعیین ارتفاع بحرانی استفاده می شود، که γ در آن نشان دهنده وزن مخصوص خاک است. همچنین $G\delta/CH$ به عنوان شاخص تغییر شکل های ایجاد شده در محل لغزش است. G مدول برشی خاک و δ تغییر مکان است.

با جستجو در مراجع فنی می توانید تعداد زیادی متغیرهای بدون بعد، پیدا کنید. مثال های بالا برای توجه به ضرورت استفاده از متغیرهای بدون بعد و نرمالیزه است.

ارتباط با سایر متغیرها

در نتیجه گیری ها اغلب تلاش می شود رابطه ای (correlation) بین جواب های آزمایش های مختلف یا متغیرهای گوناگون با هم ارائه شود.

روابط تجربی کاربرد زیادی در ژئوتکنیک دارند و به طور معمول متغیری را که اندازه گیری آن مشکل است، به متغیرهای ساده تر ربط می دهند. البته ارائه روابط ریاضی مشکل و بدون معنا، مثل یک چند جمله ای درجه ۴ چندان مطلوب نیست. البته رابطه ای که متغیرهای بیشتری را در خود می گنجاند، به نحوی پیشرفته تر محسوب می شود. سادگی به معنای کاهش متغیرهای موثر نیست، بلکه به مفهوم استفاده از روابط ساده ریاضی است.

به عنوان یک رابطه ساده معنادار، می توان رابطه زیر را برای تعیین چسبندگی (C_u) زهکشی نشده رس های عادی تحکیم یافته در عمقی با تنش موثر (σ') ملاحظه کرد.

$$C_u/\sigma' = A\,(PI) + B$$

در این رابطه C_u/σ' متغیر معناداری است، زیرا با افزایش تنش موثر می توان انتظار افزایش چسبندگی زهکشی نشده رس عادی تحکیم یافته را به طور طبیعی در تمام رس ها داشت. مقدار این نسبت در یک خاک رس ثابت است. آنچه از یک خاک رس به رس دیگر فرق می کند، در کانی های رسی و ساختمان آن نهفته است، که PI در رابطه بالا نشانگر آن خواهد بود.

ایجاد ارتباط با شبکه عصبی

گاهی پدیده مورد مطالعه دارای تعداد زیادی متغیر موثر است. به بیان دیگر متغیر مورد توجه ما تابع تعداد زیادی متغیر دیگر است. در این شرایط نمی توان به سادگی بین متغیر مورد نظر و سایر متغیرها رابطه ای ایجاد کرد و روابط همبستگی چند متغیره نیز به دلیل تعداد زیاد متغیرها، کارساز نیست. در این نوع مسائل می توان با استفاده از داده های موجود هوش محاسباتی تشکیل داد. هوش محاسباتی با تشکیل شبکه عصبی آموزش داده شده به وجود می آید.

آموزش شبکه عصبی با استفاده از تعداد کافی داده انجام می شود.

برای تشکیل هوش محاسباتی نخست به الگوریتم یا برنامه ای برای تشکیل شبکه عصبی نیاز داریم، که می توان از نرم افزارهای عمومی ریاضی مثل Matlab یا نرم افزارهای خاص شبکه عصبی استفاده کرد. دوم این که به مقدار کافی داده می خواهیم که با آنها شبکه عصبی را آموزش دهیم. منطقی این است که تمام داده های موجود خود را برای آموزش به کار نبریم، بلکه بخشی را برای کنترل استفاده کنیم.

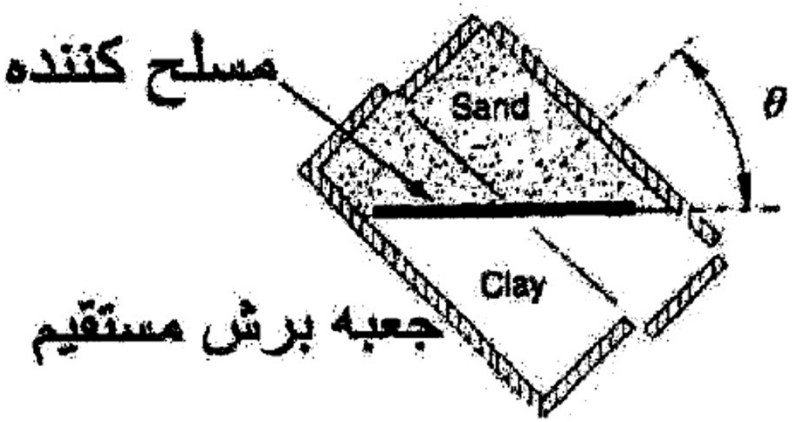
مسائل خاص– نمونه های مرکب

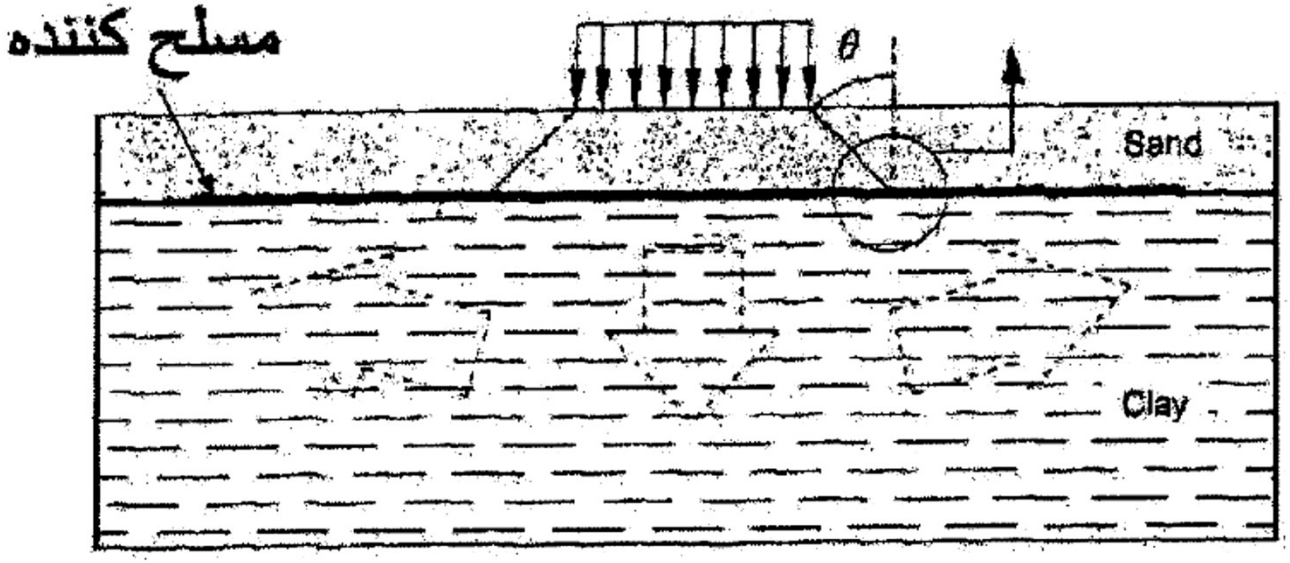
نمونه های مرکب از چند نوع مصالح تشکیل می شوند.

گاهی انتخاب نمونه های مرکب به سادگی و بدون پیش فرض های خاص در مورد ساز و کار سازه خاکی صورت می گیرد. برای مثال در آزمایش صافی که توسط شرارد توصیه شده، نمونه ای مرکب از خاک و صافی در آزمایشگاه بررسی می شود.

ممکن است انتخاب نمونه مرکب پیچیده تر از حالت ذکر شده در آزمایش صافی باشد. برای مثال نمونه های مورد مطالعه در بررسی بارهای وارد بر یک لایه ماسه ای مسلح واقع بر رس های بسیار نرم در شکل ملاحظه می شود.

این یافته، نتایج جالبی را در مورد ساختمان مناسب مسلح کننده ها به همراه داشت. زیرا نشان داد که ژئوسینتتیک های با ساختمان سه بعدی به دلیل تحمل خمشی بیشتر، برای کار بر روی رس های بسیار نرم مناسب اند.


مسلح کننده
Sand
θ
Clay
جعبه برش مستقیم


مسلح کننده
θ
Sand
Clay

گاهی در انتخاب نمونه های مرکب و مطالعه تجربی آنها ساده سازی های بزرگی انجام می شود، که با واقعیت مغایرت دارد. برای مثال وقتی که یک نمونه خاک مسلح براساس شکل با دستگاه برش مستقیم مطالع می شود، یکی از بزرگترین ساده سازی ها را می توان محدود بودن طول ژئوسینتتیک یا مسلح کننده در آزمایش با دستگاه برش مستقیم، قلمداد کرد. در واقعیت طول مسلح کننده بسیار بزرگتر از محدوده نمونه مورد مطالعه است. اما نکته اصلی این است که با وجود ساده سازی ها باید ساز و کار اصلی در مسئله حفظ شود و بتوان با مطالعه نمونه آزمایشگاهی به ساز و کار موثر و عوامل موثر بر آن پی برد. ساده سازی در تحقیق بر نمونه اجتناب ناپذیر است. اگر بخواهیم تشابه به نسبت کاملی با شرایط واقعی به وجود آوریم، لازم است از مدلسازی فیزیکی و سایر روش های تحقیق استفاده کنیم.

آزمایش های شاخص

با وجود اینکه در بررسی تجربی نمونه ها تلاش می شود شرایط نمونه در آزمایشگاه، تا حدودی مشابه شرایط واقعی باشد، برخی از آزمایش ها به هیچ وجه با هدف تشابه با شرایط واقعی طراحی نمی شوند. در این نوع آزمون ها که آزمایش شاخص (index test) خوانده می شوند، تلاش خواهد شد که یک متغیر شاخص تعیین شود. برای مثال اندازه گیری حد روانی خاک ها با جام کاساگرانده براساس شبیه سازی شرایط نمونه و واقعیت قرار ندارند. آزمایش تعیین حد روانی یک آزمون شاخص خاک است.

مدل های فیزیکی

مسائل مختلفی در شاخه های گوناگون علوم مهندسی با استفاده از مدل های فیزیکی مطالعه شده اند. یک مدل فیزیکی در واقع "کوچک شده سازه و یا توده واقعی به مقیاس مورد نظر" است.

اگر مدل فیزیکی براساس اصول صحیح طراحی و ساخته شده باشد، رفتار آن بسیار شبیه واقعیت خواهد بود و با مطالعه مدل فیزیکی می توانیم اطلاعات بسیار خوبی از واقعیت بدست آوریم.

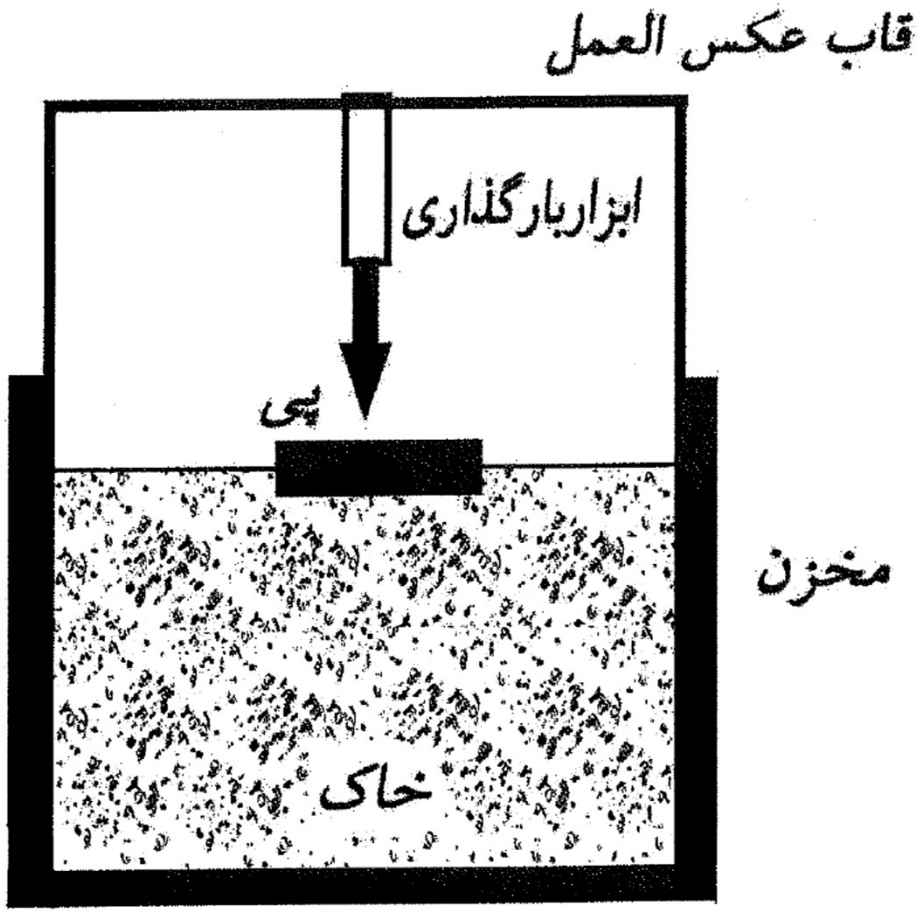
هرگز رفتار مدل فیزیکی به صورت کامل منطبق بر رفتار نمونه واقعی نیست و همواره تفاوت های کوچک یا بزرگی به دلایلی مثل اثر مقیاس، وجود دارد. اثر مقیاس بسیار مهم است و به معنای تاثیر کوچک کردن سازه یا توده واقعی بر رفتار است. تفسیر نتایج مدل های فیزیکی باید با توجه به اثر مقیاس انجام شود.

مدل های فیزیکی در ژئوتکنیک را می توان به دو دسته کلی (الف) مدل های معمولی یا تحت شتاب جاذبه زمین و (ب) مدل های تجت چند برابر شتاب جاذبه زمین یا مدل های سانتریفیوژ، تقسیم کرد.

اصول کلی انواع مدل سازی فیزیکی یکسان و اصلی ترین تفاوت، در ابزار مورد استفاده است.

مثال هایی از مدل های فیزیکی

ظرفیت باربری پی های سطحی بیش از سایر مسائل ژئوتکنیکی با استفاده از مدل های فیزیکی توسط محققان مختلف مطالعه شده است.



مطالعات قدیمی با مدل های فیزیکی، منجر به ارائه و اصلاح روابط ظرفیت باربری پی های سطحی شد.

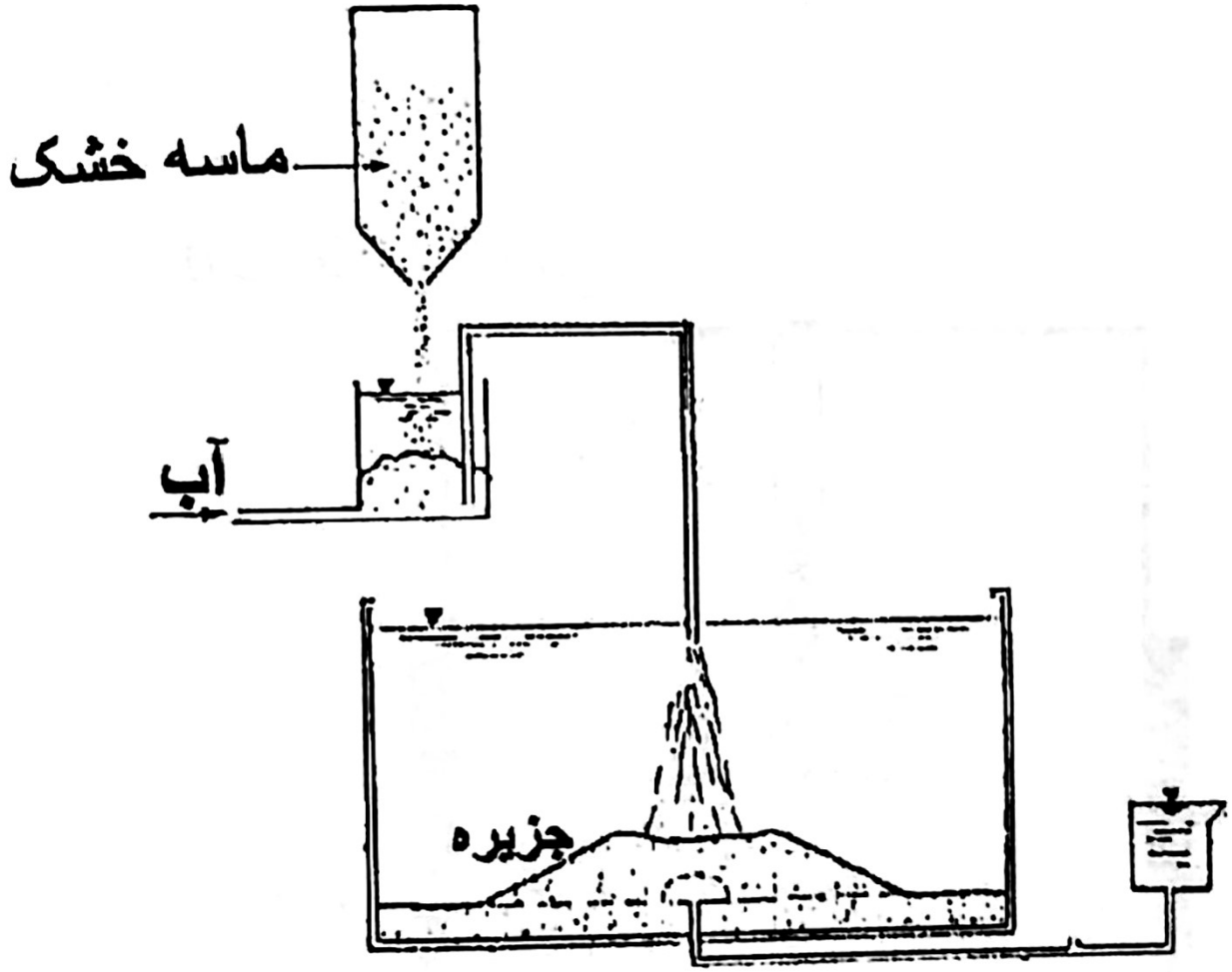
امروزه درباره روابط ظرفیت باربری در شرایط خاص و جدید که در گذشته مطالعه نشده اند (مثل پی هایی با شکل های جدید یا در صورت استفاده از ژئوسینتتیک در زیر پی و خاک) تحقیق می شود. برای مثال، پارنج (۱۳۷۷) ظرفیت باربری پی هایی به شکل پای اردک را مطالعه کرد و ضریب شکل آن را بدست آورد. شکل پای اردکی برای پی سکوهای خود بالارو که در بسترهای لجنی آب های کم عمق یا متوسط در رودخانه و یا دریا مستقر می شوند، به کار می رود.

به عنوان مثالی دیگر از تحقیق در مورد ظرفیت باربری در شرایط خاص و جدید، می توان به پایان نامه دکتری ذکریا (Zakaria, 1994) اشاره کرد. وی ظرفیت باربری یک لایه ماسه ای مسلح شده با ژئوگرید در پایین را بر روی رس های بسیار نرم و لجن مطالعه کرد. باربری و تغییر شکل پی های عمیق و همچنین رفتار گروهی آنها نیز با استفاده از مدل های فیزیکی بررسی شده است.

پژوهش در مسائل هیدرولیکی در ژئوتکنیک همچون تراوش نیز، سابقه طولانی استفاده از مدل های فیزیکی دارد. مدل های فیزیکی تراوش آب در خاک در مجاورت سپرها یا سدهای خاکی و مشاهده مسیر جریان با مواد رنگی در بسیاری از آزمایشگاه ها حتی برای آموزش جریان آب در خاک به کار می رود.

گاهی مسائل هیدرولیکی پیچیده تری مثل احداث خاکریزهای هیدرولیکی نیز با مدل های فیزیکی مطالعه شده اند. خاکریز هیدرولیکی از پمپاژ مخلوط آب و خاک به وجود می آید و در واقع روشی برای انتقال خاک است و در پروژه هایی مثل بازیافت زمین از دریا کاربرد زیادی دارد.

شکل زیر مدل فیزیکی احداث جزیره مصنوعی با روش خاکریز هیدرولیکی را نشان می دهد.



در محدوده موضوعات تحقیقاتی مرتبط با تونل نیز خیلی از مدل های فیزیکی استفاده شده است. برای مثال حفر یک عدد تونل جدید در نزدیکی تونل موجود و اثرات حفاری تونل جدید بر تونل قدیم، موضوع پیچیده ای است و امکان تحقیق با مدل های فیزیکی را دارد. برای این تحقیق لازم است دستگاه ساده ای با ابعاد کوچک برای حفاری تونل جدید در مدل فیزیکی به کار گرفته شده و تنش ها و تغییر شکل ها در تونل قدیم، در حین حفاری تونل جدید اندازه گیری شود.

به عنوان روش دیگری برای شبیه سازی عملکرد تونل جدید می توان آنرا با بالشتکی از هوا پر کرد و سپس فشار بالشتک را کاهش داد.

ابزار متداول مدل های فیزیکی

با توجه به تنوع گسترده انواع مدل های فیزیکی در ژئوتکنیک بدیهی است که انواع بسیار زیادی از ابزار گوناگون استفاده می شود.

در این بخش فقط به برخی ابزار متداول اشاره خواهیم کرد.

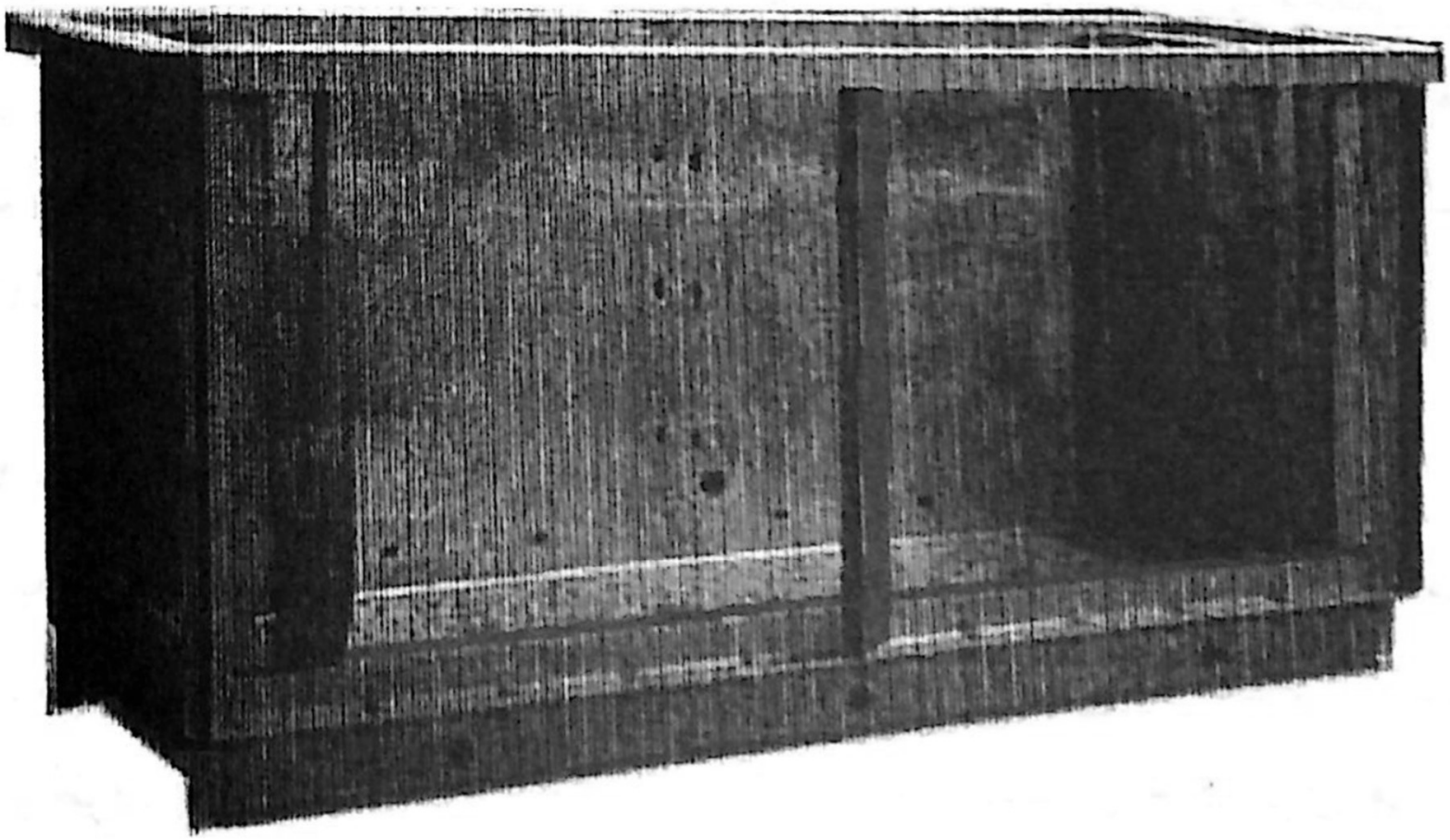
محققی که قصد ساختن یک مدل فیزیکی برای تحقیقات مورد نظر خود را دارد، ابتدا باید با ابزارهایی که دیگران به کار برده اند، آشنا شود و سپس ابزار مربوط به مدل خود را با توجه به هدف تحقیق و امکانات و مدت زمان در دسترس، انتخاب کند.

مخزن خاک

به طور معمول مدل های فیزیکی شامل مخزن خاک با ابعاد مناسب اند. اندازه مخزن باید آنقدر بزرگ باشد که مرزهای مدل یا به بیان ساده، دیواره های مخزن تاثیری بر نتایج نداشته باشد. از طرف دیگر مخزن نباید آنقدر بزرگ باشد که آماده سازی خاک برای هر آزمایش را مشکل کند. فکر کردن به روش تخلیه خاک و آب از مخزن، پس از اتمام هر آزمایش، لازم است. برای تخلیه خاک می توان از وسایل دستی همچون بیلچه استفاده کرد، ولی گاهی ساده تر است که دریچه در کف مخزن تعبیه شود و یا دیواره های مخزن قابل جدا شدن باشند. برای تخلیه آب نیز می توان دیواره ها یا کف را سوراخدار کرد. همچنین امکان زهکشی حین آزمایش (با توجه به نوع آزمایش) می تواند ضروری باشد.

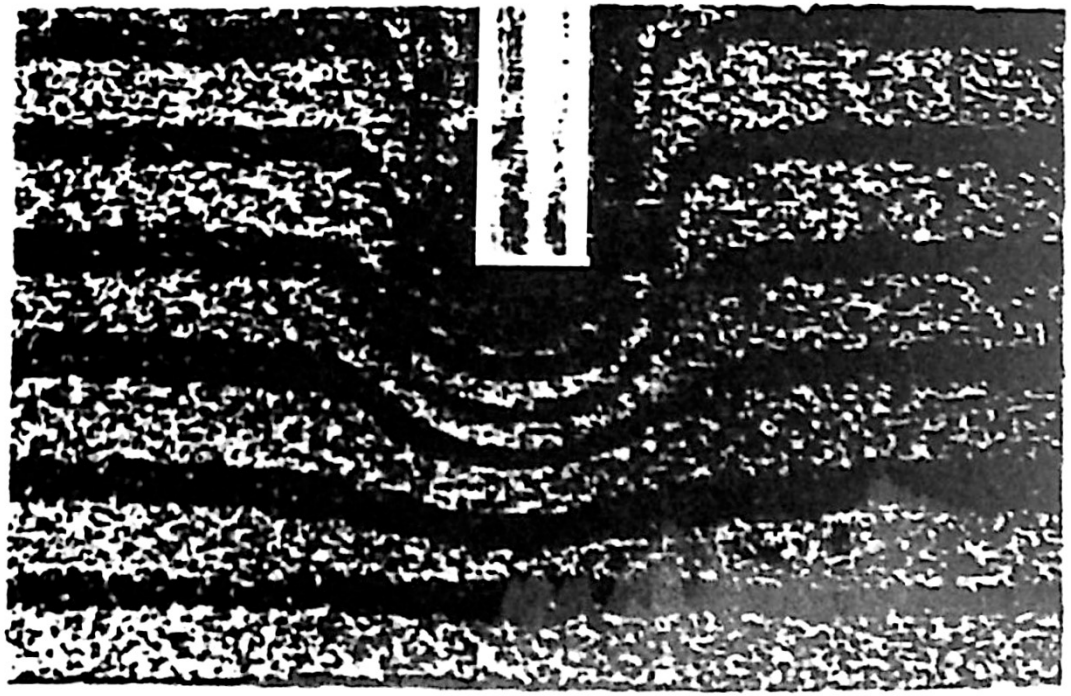
دیواره مخزن اغلب فلزی و غیرقابل انعطاف اند. گاهی دیواره های شفاف برای رویت خاک درون مخزن بکار می رود.

شکل زیر تصویری از یک مخزن خاک با دیواره شفاف در جلو را نشان می دهد.



این مخزن دارای دیوارهای جدا شدنی و کف سوراخ دار برای خروج آب است.

همانطور که گفته شد دیواره های جلویی شفاف اند تا امکان مطالعه نحوه تغییر شکل خاک و الگوی گسیختگی احتمالی را نشان دهند. دیواره های شفاف در مدل های دو بعدی کاربرد زیادی دارند و استفاده از مصالح خاکی با رنگ های مختلف برای رویت پدیده های مورد مطالعه سابقه دارد. شکل زیر نشان دهنده الگوی تغییر شکل خاک در مجاورت نوک یک شمع است.



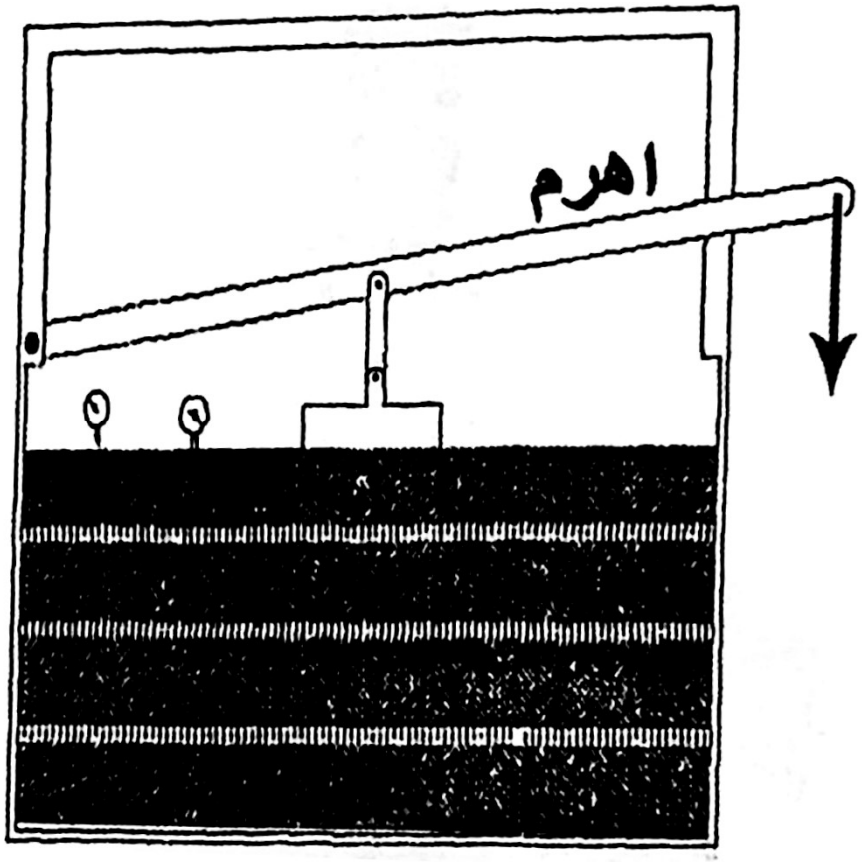
گاهی دیواره های داخلی مخزن خاک در مدل های فیزیکی روغن کاری می شود، تا اصطکاک خاک و دیواره های داخلی مخزن در راستای قائم کاهش یابد. کاهش اصطکاک با دو لایه پلاستیکی صاف هم مقدور است. هر چه اصطکاک دیواره مخزن و خاک کمتر باشد، اثر دیوار بر نتایج کاهش یافته و می توان ابعاد مخزن را کوچکتر کرد. در ضمن کاهش اصطکاک موجب می شود پدیده کمان زدگی (Arching) به وجود نیاید. اگر فاصله دو دیوار مخزن کم باشد آنگاه در هنگام نشست خاک در درون مخزن، نوعی کمان زدگی بروز می کند که موجب انتقال تنش های اضافی به دیواره های مدل می شود. این کمان ها نشان دهنده جهت تنش های اصلی اند و مانع نشست آزادانه خاک خواهند شد. توجه به پدیده کمان زدگی خاک در بین دیواره های مخزن یک مدل فیزیکی، اهمیت دارد و باید در تعیین ابعاد مخزن در مدل مورد توجه باشد.

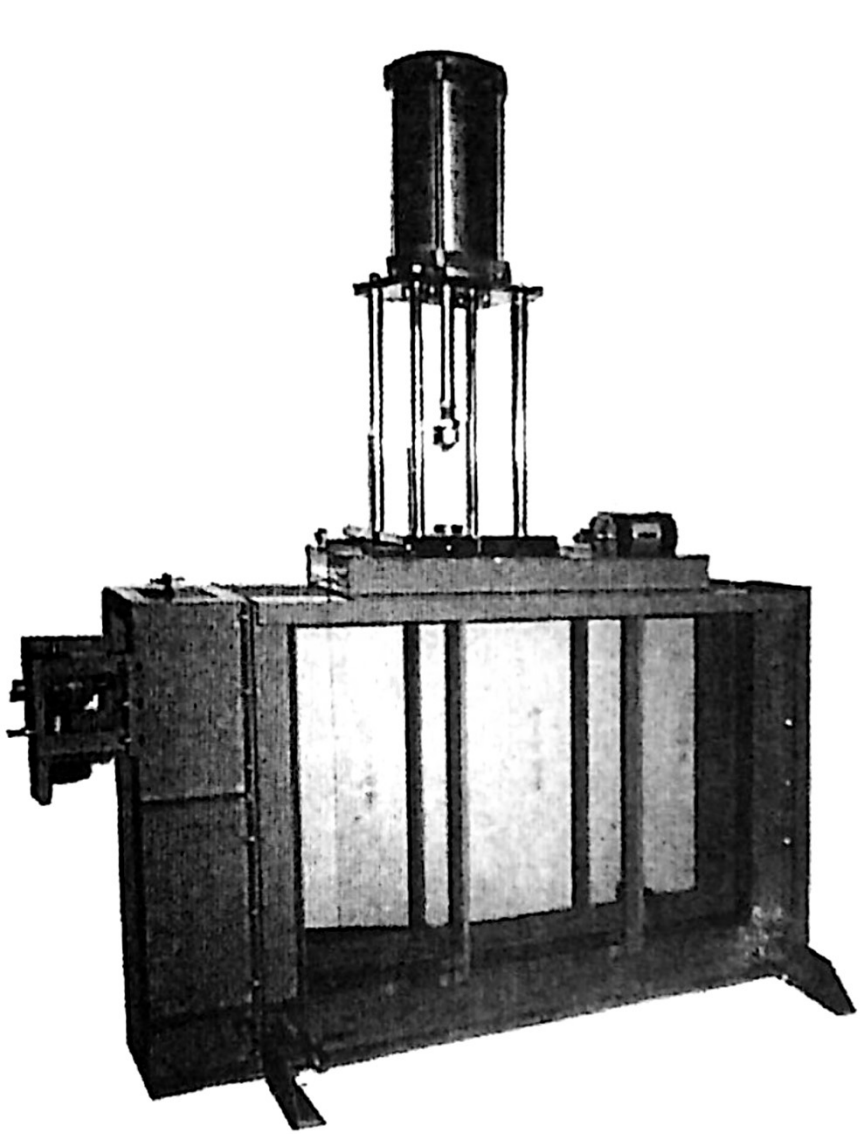
ابعاد مخزن خاک و فاصله مرز در مدل های دینامیکی می تواند خیلی بزرگتر از مدل های استاتیکی باشد. برای مثال در یک مدل استاتیکی پی سطحی باید دیواره مخزن یا مرز مدل آنقدر از پی دور باشد که تنش پی به آن نرسد، ولی در مطالعه تحکیم دینامیکی باید مرزها یا دیواره های مخزن خاک، آنقدر از پی دور باشند، که حتی موج ناشی از ضربه یا بار دینامیکی در آزمایش ها هم به مرز نرسد.

گاهی لازم می شود که نوعی مرزهای جاذب ارتعاش یا انرژی در دیواره مخزن بکار رود، اما فراهم کردن چنین مرزهای جاذبی در عمل مشکل است. بنابراین همواره به خاطر داشته باشید که معیارهای تعیین ابعاد مخزن در مدل های دینامیکی، بیشتر از مدل های استاتیکی است و ابعاد مخزن خاک باید آنقدر بزرگ باشد که تاثیری بر پدیده مورد مطالعه در مدل نگذارد.

ابزار بارگذاری

در بسیاری از مدل های فیزیکی مثل مدل پی های سطحی، باید نوعی بارگذاری انجام شود. اعمال مستقیم بار با وزنه بسیار مشکل است و برای بارهای کوچک و تعداد اندک آزمایش توصیه می شود. اعمال وزنی بار با استفاده با اهرم و قرقره سابقه دارد. شکل اعمال بار با اهرم را نشان می دهد.





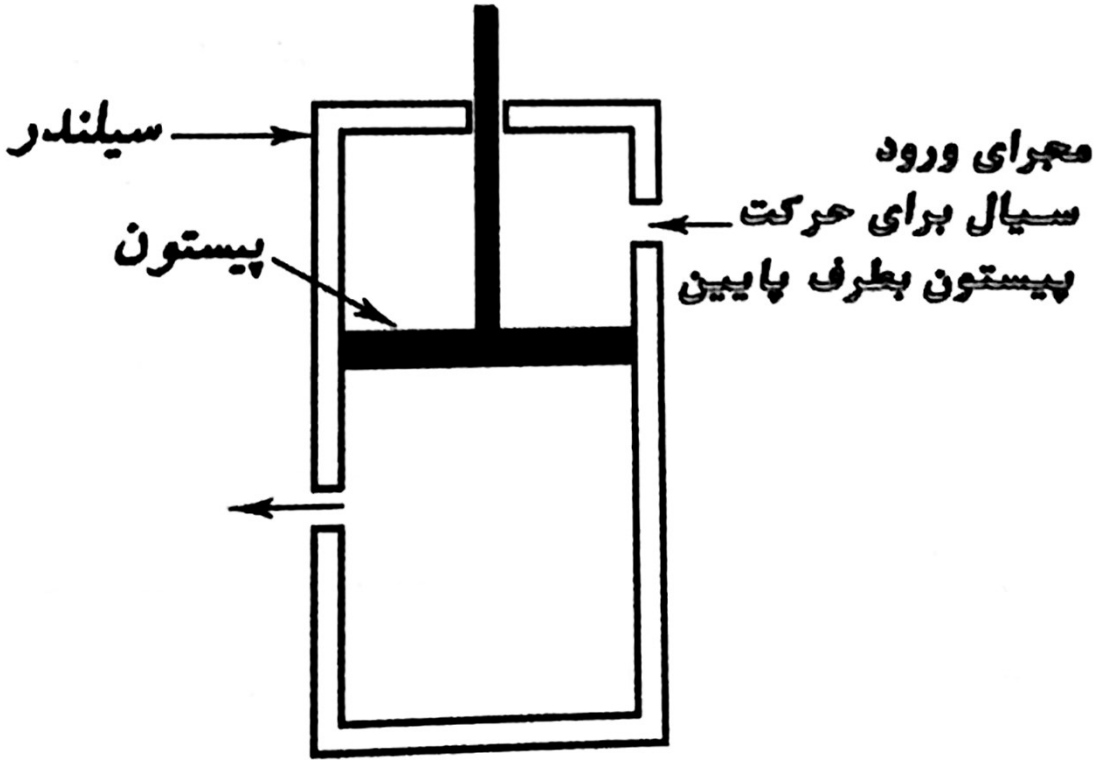
اگر تغییر مکان زیاد باشد، اهرم تغییر زاویه می دهد و همانطور که در شکل قابل استنباط است، راستای بار تغییر می کند. بنابراین با استفاده از روش نشان داده شده در شکل نمی توان تغییر مکان قائم خیلی بزرگی اعمال کرد.

جک های هیدرولیکی به صورت گسترده برای اعمال بار در مدل های فیزیکی بکار رفته اند.

این مدل امکان اعمال بار افقی را نیز با موتور کوچک نشان داده در شکل را دارد.

اعمال درازمدت بار در مدل های مطالعه خزش با استفاده از سیستم هیدرولیکی، می تواند مشکل باشد، زیرا حفظ بار جک ها در دازمدت مشکل است. هرگونه نشت جزیی روغن می تواند موجب کم شدن بار در درازمدت شود. در این مورد سیستم های وزنی مثل اهرم مناسبترند.

زمان عکس العمل روغن و هوا در جک های هیدرولیکی متفاوت است. هوا تراکم پذیرتر از روغن است، ولی با سرعت و دبی بیشتری به حرکت در می آید. بنابراین انتخاب نوع سیال بستگی به بار دارد. جک های دینامیکی دو طرفه برای اعمال بارهای رفت و برگشتی قابل استفاده اند. شکل تصویر شماتیک یک جک هیدرولیکی را شنان می دهد.



بارگذاری به دو روش کنترل تنش و کنترل تغییر شکل، اعمال می شود. برای مثال در دستگاه آزمایش سه محوری متداول، اعمال تنش همه جانبه اطراف نمونه با کنترل تنش از راه فشار سیال انجام می شود، ولی اعمال تنش محوری با کنترل تغییر شکل از راه میله بارگذاری است. اگر نرخ تغییرات بار در مسئله مورد مطالعه مهم باشد، آنگاه نیاز به دستگاه تنظیم کننده (Servo control) برای استفاده از جک های هیدرولیکی می باشد، زیرا جک های هیدرولیکی متداول اغلب کنترلی روی سرعت افزایش تنش یا تغییر شکل ندارند. در اغلب جک ها فقط می توان دبی پمپ روغن را تا حدودی کنترل کرد و از آنجا که عکس العمل روغن، در فشارهای مختلف فرق می کند، کنترل دبی روغن نیز دقت چندانی ندارد.

موتور با دور ثابت نیز می تواند برای اعمال بار به کار رود. بار افقی در دستگاه برش مستقیم خاک، با موتور انجام می شود که یک سیستم کنترل تغییر شکل است. البته برای این که سرعت دوران در موتور تغییر کند، نیاز به نوعی تغییر چرخ دنده ها (گیربکس) است. گاهی می توان موتورهایی داشت که با تغییر جریان الکتریکی ورودی، سرعت آنها تغییر نماید.

سختی قاب بارگذاری و سیستم اعمال بار، باید به درستی انتخاب شود و تا حد امکان صلب باشد.

گاهی ممکن است مقداری از تغییر شکل های اندازه گیری شده ناشی از تغییر شکل قاب بارگذاری باشد.

ابزار اندازه گیری

ابزار مناسبی برای اندازه گیری تنش کل، تنش موثر، تنش برشی، فشار آب، حجم آب، کرنش و متغیرهای دیگر ابداع شده و باید هر مدل فیزیکی با تعبیه ابزار مناسب اندازه گیری، ساخته شود.

انتخاب ابزار مناسب و تعیین روش نصب ابزار در مدل فیزیکی، در واقع بخش مهمی از طراحی یک مدل فیزیکی محسوب می شود.

دقت ابزار اندازه گیری باید در حد دقت مورد نیاز باشد. منظور از دقت در اینجا، حداقل کمیت قابل اندازه گیری با ابزار مورد نظر است. علاوه بر دقت، کالیبراسیون نیز اهمیت دارد.

ابزار الکترونیکی اندازه گیری به صورت گسترده جایگزین ابزار مکانیکی شده اند. در ابزارهای الکترونیکی اغلب تغییر مقاومت الکتریکی موجب تغییر جریان می شود.

دستگاه ثبت داده ها (data logger) برای نگهداری داده های حاصل از اندازه گیری با ابزار الکترونیکی، به کار می رود.

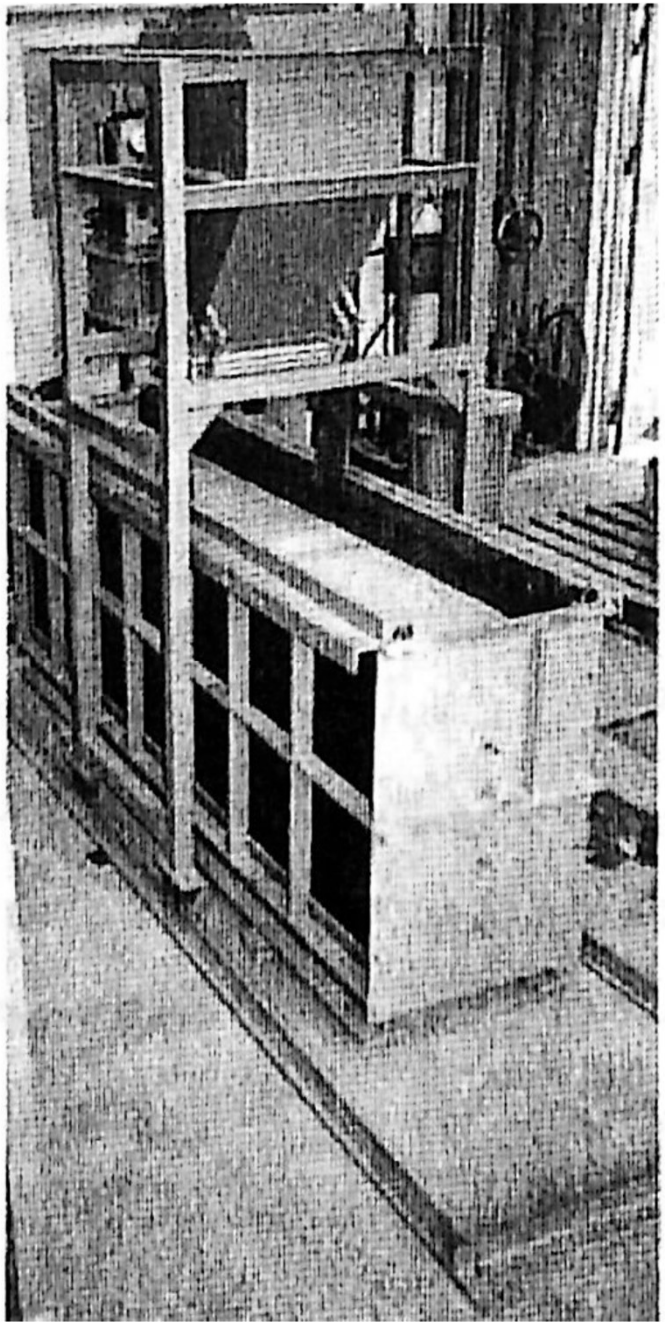
در دستگاه های ثبت داده های دینامیکی ، میزان برداشت در واحد زمان بیشتر از دستگاه های ثبت داده های استاتیکی است.

تهیه نمونه

آزمایش های مدل فیزیکی اغلب بر روی نمونه های دست خورده خاک انجام می شوند. نمونه های دست خورده خاک اغلب ماسه استاندارد یا رس و لای دارای خواص مشخص اند و باید با دانسیته مورد نظر و به صورت همگن تهیه شوند.

مدل خاک ماسه ای در آزمایشگاه با روش های مختلفی مثل بارش، تراکم، ریختن با قیف و یا رسوب در آب به وجود می آید. برای روش بارش لازم است مخزنی از خاک که به طور دقیق دارای پلان برابر با مخزن اصلی است، در بالای مدل و در ارتفاع مشخص قرار گیرد. با تغییر ارتفاع سقوط ماسه می توان خاک با تراکم مورد نظر را به وجود آورد.

روش تراکم خاک بسیار ساده تر از روش بارش است و با کوبیدن لایه لایه خاک انجام می شود. علاوه بر روش های بارش و تراکم می توان از ریختن ماسه از درون یک قیف سبک دستی یا قیف بزرگ استفاده کرد.



شکل روش بکارگیری قیف را نشان می دهد.

بسیاری از محققان معتقدند که ایجاد نمونه در حالت تخلخل حداکثر فقط با رسوب دادن نمونه در آب مقدور است.

آماده سازی نمونه خاک رس و لای تحکیم یافته در آزمایشگاه، برای مدل فیزیکی اغلب مشکل و وقت گیر است.

نمونه های رس و لاس بسیار سست و با رطوبت بیشتر از حد روانی را می توان با مخلوط کردن آب و خاک در همزن به وجود آورد.

سابقه کاربرد مدل های فیزیکی روی خاک های ماسه ای بیشتر از نمونه های رسی است. شاید یکی از دلیل های آن را بتوان مشکلات تهیه نمونه های رسی در مدل های فیزیکی دانست.

تهیه نمونه در یک نوع مصالح نباید موجب پاک کردن صورت مسئله شود. در این موارد باید با درک کاستی ها و محدودیت ها، تحقیق کرده و سطح انتظارات را کاهش داد.

تنش همه جانبه تاثیر زیادی بر سختی خاک های ماسه ای دارد. از آنجا که سطح تنش در مدل های فیزیکی (یک g) خیلی کمتر از تنش های واقعی است، گاهی ماسه مورد استفاده در مدل را با سختی (یا تخلخل) متفاوت با واقعیت می سازند. به بیان ساده سختی یا تخلخل ماسه در مدل را چنان انتخاب می کنند که سختی آن در تنش همه جانبه کوچک موجود در مدل فیزیکی، متناسب با واقعیت باشد. یعنی خاک در مدل فیزیکی و در واقعیت با وجود تخلخل متفاوت، مشابه هم عمل می کنند. برای تعیین نسبت سختی ها و تناسب مدل و واقعیت باید از تحلیل ابعادی استفاده شود.

ابعاد نمونه ها در مدل های سانتریفوژ اغلب کوچکتر از ابعاد نمونه ها در مدل های فیزیکی معمولی (یک g) است. کوچک بودن ابعاد نمونه، مشکلاتی در نصب ابزرا اندازه گیری و سایر ابزار در خاک به وجود می آورد، زیرا ابزار اندازه گیری مثل سلول های اندازه گیری تنش و نظایر آن، دارای حجم و وزن بوده و قرار دادن آنها در درون نمونه خاک در آزمایش سانتریفوژ خیلی کوچک است.

در تحقیقات متوالی با استفاده از مدل های فیزیکی و آزمون های آزمایشگاهی سعی می شود خاک عوض نشود. با این کار می توان نتایج آزمایش متوالی را به هم ربط داد.

ابزار مدل های لرزه ای

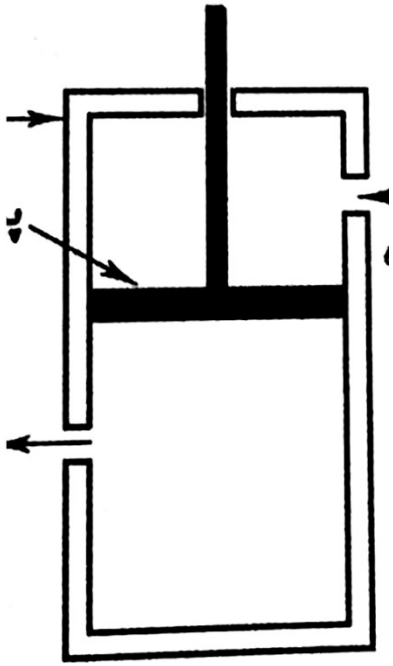
با استفاده از مدل های لرزه ای می توان رفتار سازه های ژئوتکنیکی را در اثر زلزله مطالعه کرد.

ابزار اندازه گیری و ابزار ثبت داده در مدل های لرزه ای باید دینامیکی باشند. یعنی تعداد قرائت یا ثبت داده در آنها، در واحد زمان برای مطالعه پدیده های دینامیکی کافی باشد.

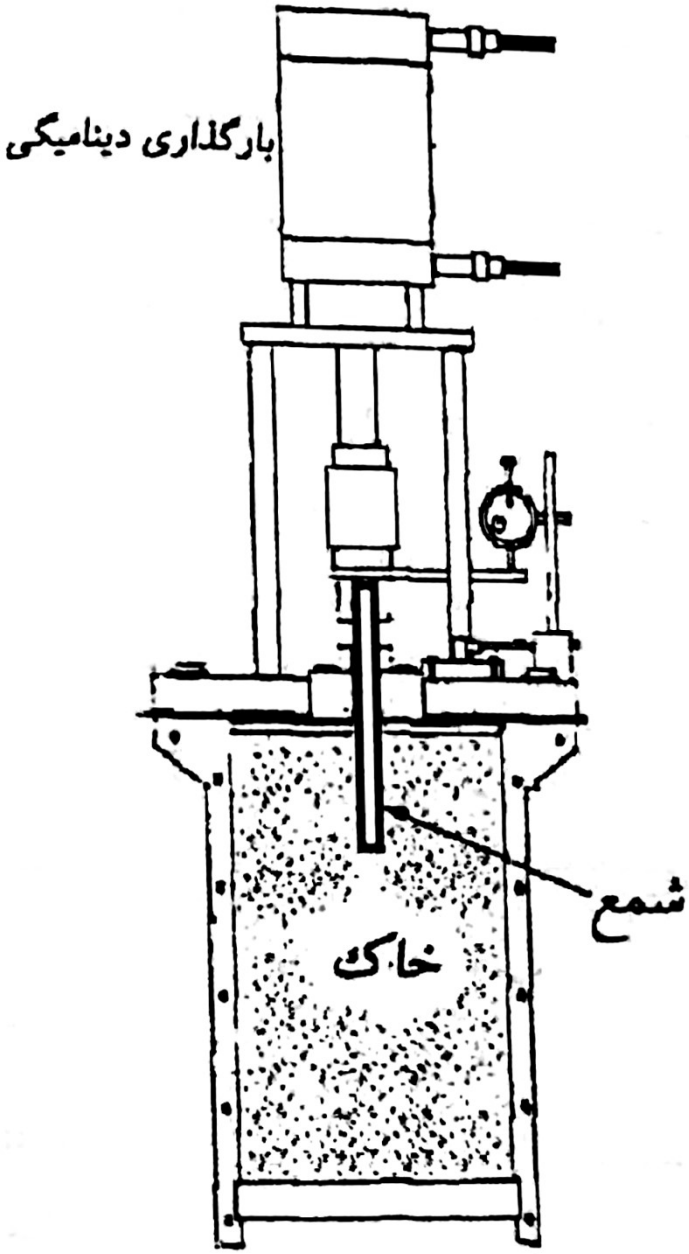
جک های دو طرفه

جک های دو طرفه برای اعمال بارهای رفت و برگشتی به کار می روند.

نحوه کار جک هیدرولیکی در شکل نشان داده شده است.



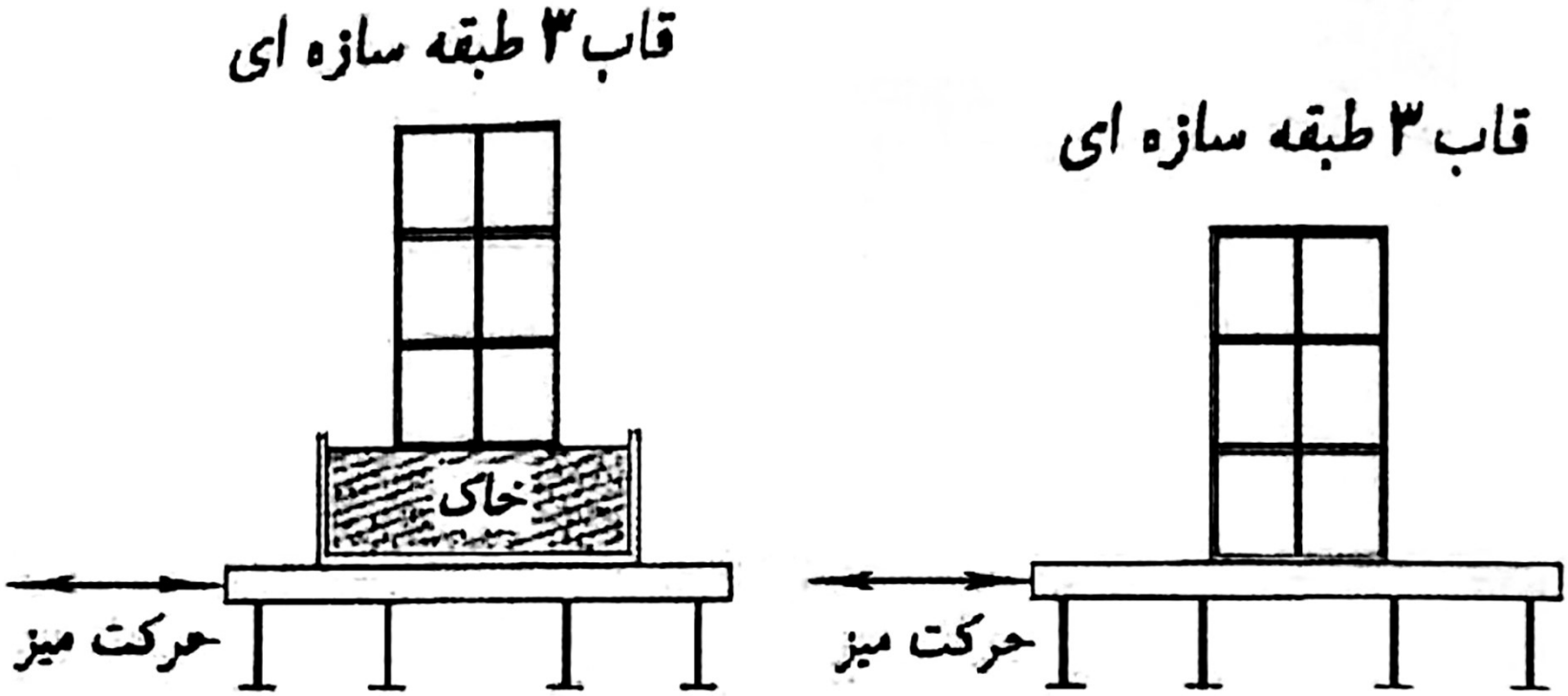
اگر محل ورود و خروج سیال داخل سیلندر به سرعت عوض شود، فشار در طرفین پیستون نیز تغییر می کند. در این شرایط نیروی پیستون کم و زیاد می شود و به اصطلاح نیروی دینامیکی اعمال خواهد شد. مجرای ورود سیال برای حرکت پیستون به طرف پایین تبدیل به مجرای خروج سیال در هنگام حرکت به طرف بالا می شود و این تعویض پیوسته انجام خواهد شد.



شکل مثالی از شمع تحت بار رفت و برگشتی را نشان می دهد.

میز لرزه (یک g)

میز لرزه با حرکت خود در واقع حرکت زلزله را شبیه سازی می کند و نیروی زلزله را در خاک یا سازه به وجود می آورد. بنابراین مطالعه با میز لرزه نسبت به مطالعه با جک های رفت و برگشتی اولویت دارد. توده خاک همراه با سازه روی میز لرزه ساخته می شود و رفتار آن تحت زلزله مطالعه می شود. شکل زیر میز لرزه را در دو حالت نشان می دهد.

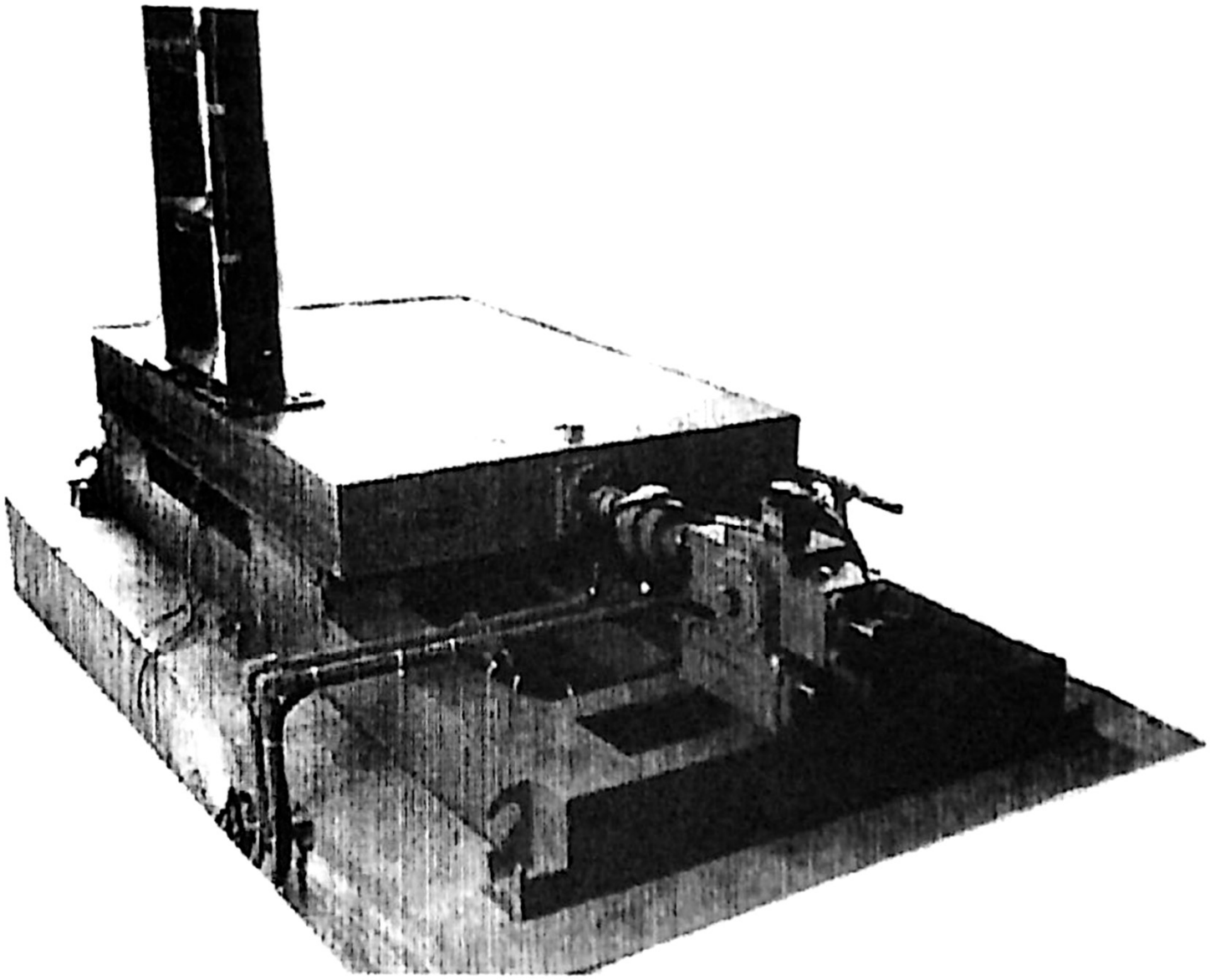


در حالت اول ساختمان مستقیم بر روی میز لرزه قرار دارد بنابراین نمی توان تاثیر خاک را مدل کند. حالت دوم واقع بینانه تر است، زیرا سازه بر روی خاک و نه بستر صلب قرار دارد.

حرکت میز لرزه در راستاهای مورد نظر اغلب با جکهایی انجام می شود که قابلیت شبیه سازی دقیق لرزش زلزله را دارند. البته میز لرزه با ابعاد متوسط و کوچک را، می توان توسط نیروی انسانی با دست لرزاند و همواره به جک های ویژه نیاز نداریم. البته ارتعاش ناشی از زلزله در میزهای دستی تکرارپذیر نیست و در ضمن نمی توان حرکت زلزله را به طور دقیق اعمال کرد.

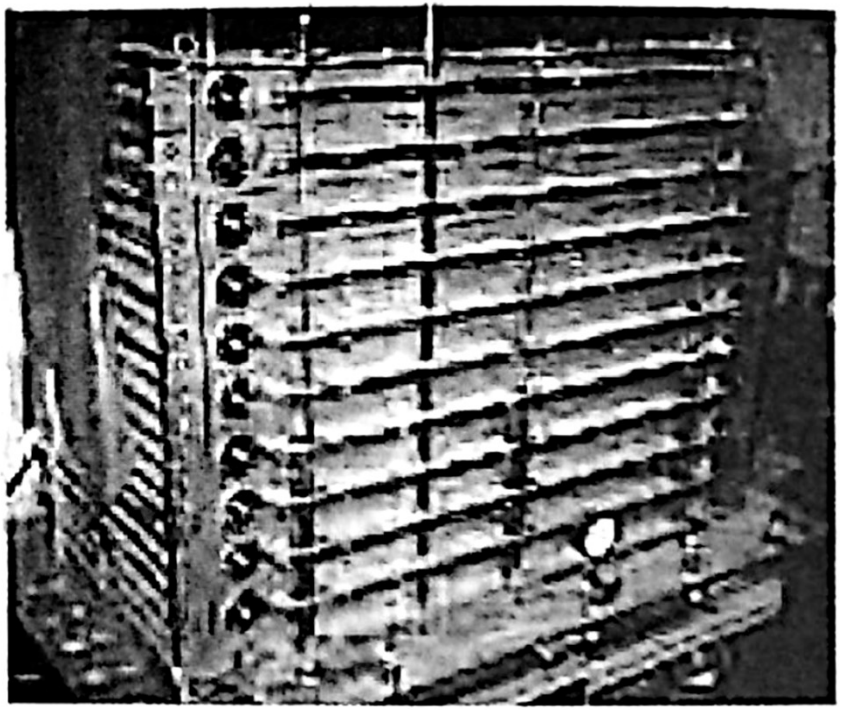
یک میز لرزه ساده مثل شکل فقط در راستای افقی حرکت می کند، ولی میزهای پیشرفته می توانند در راستاهای مختلف حرکت لرزه ای اعمال کنند.

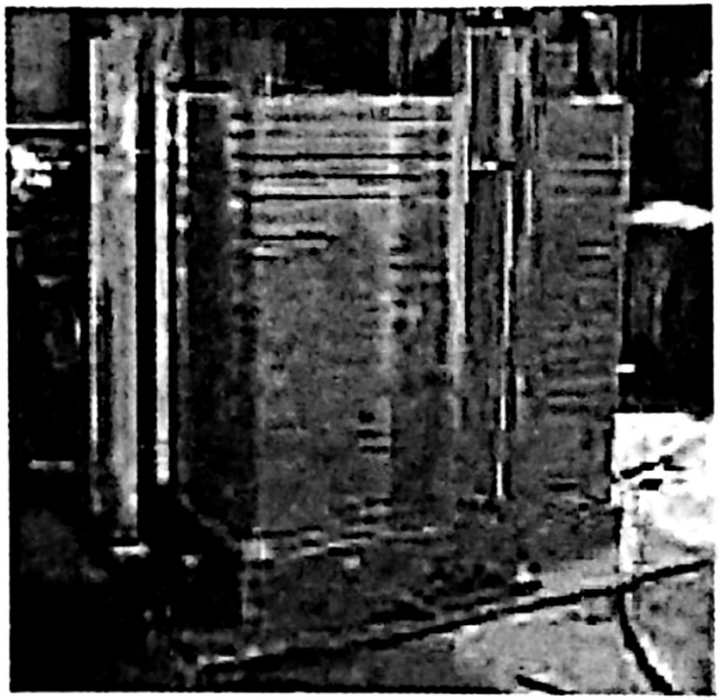
شکل یک میز لرزش چند جهته را نشان می دهد.



استفاده از مخزن لایه ای

استفاده از مخزن لایه ای (laminar box) به منظور شبیه سازی مرزهای قائم مخزن خاک در مدل، با شرایط واقعی زمین در هنگام زلزله انجام می شود. شکل مثالی از یک مخزن لایه ای را نشان می دهد. مخزن لایه ای در واقع مخزنی است که دیواره های آن از لایه های مختلف تشکیل شده و به راحتی می تواند تغییر شکل بدهد، بنابراین به شرایط واقعی نزدیک تر است.





تحلیل ابعادی

تحلیل ابعادی (dimensional analysis) کاربرد زیادی در پژوهش با مدل های فیزیکی دارد و برای مطالعه پدیده مورد نظر با استفاده از متغیرهای بدون بعد، قابل استفاده است. از آنجا که هر پدیده تابع تعدادی متغیر دارای دیمانسیون است، تحلیل ابعادی با تبدیل معادلات حاکم بر آن پدیده به معادلات بدون بعد موجب سهولت مطالعه می شود. به کارگیری متغیرهای بدون بعد موجب خواهد شد که قوانین تشابه مدل فیزیکی و نمونه واقعی به دست آید. اصلی ترین کاربرد تحلیل ابعادی را می توان ارتباط دادن رفتار مدل فیزیکی و واقعیت با یکدیگر دانست.

روش کار

اگر تابع حاکم بر یک سیستم را f و متغیرهای مستقل آن را a_i بنامیم و داشته باشیم:

$$f(a_1, a_2, \ldots, a_m)=0$$

یعنی سیستم مورد مطالعه به تعداد m عدد، متغیر مستقل دارد. در تحلیل ابعادی لازم نیست که معادله f را بدانیم و فقط کافیست که متغیرهای مستقل را بشناسیم. اگر تعداد دیمانسیون موجود در مسئله n عدد باشد، آنگاه به تعداد تفاضل m و n یعنی m-n عدد متغیر بدون بعد و مستقل می توان یافت، که کل سیستم را به صورت تابع آنها بیان کنیم. اگر متغیرهای مستقل را π_i و تابع حاکم را g بنامیم، آن گاه خواهیم داشت:

$$g(\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_{m-n})=0$$

همچون f لازم نیست که معادله g را برای آنالیز ابعادی در دست داشته باشیم و فقط باید متغیرهای بدون بعد (π_i) تعیین شوند. تعداد بیشماری متغیر بدون بعد در یک مسئله می توان تعریف کرد، که همگی مستقل از هم نیستند و همچنین معنای فیزیکی روشنی ندارند. بنابراین انتخاب مناسب متغیرهای بی بعد برای موفقیت تحلیل ابعادی ضروری است.

انتخاب مناسب متغیرهای بدون بعد (π_i) اهمیت دارد. برای انتخاب متغیرهای بدون بعد، روش ساده این است که نخست n متغیر مستقل (a_i) چنان انتخاب شوند که تمام n دیمانسیون موجود در مسئله را در خود گنجانده باشند. آنگاه سایر متغیرهای a_i چنان با n متغیر اول ترکیب می شوند، که به تعداد m-n متغیر بدون بعد (π_i) به دست آید. درک فیزیکی محقق از مسئله می تواند موجب شود که تمام یا برخی از متغیرهای π_i دارای معنای فیزیکی شناخته شده ای باشند.

تحلیل ابعادی برای تعیین قواعد تشابه در مدل های فیزیکی قابل استفاده است. مقدار هر متغیر بدون بعد در مدل و واقعیت باید یکسان باشد. یعنی داریم:

$$(\pi_i)_{model}=(\pi_i)_{prototype}$$

این قاعده برای تعیین قواعد تشابه به کار می رود. یعنی با این قاعده می توانیم هر متغیر دارای دیمانسیون در مدل را به مقدار مشابه آن در واقعیت، ربط دهیم.

مثال تحلیل ابعادی باربری جدار شمع در ماسه ها

باربری جدار شمع های حفاری شده با بتن ریزی درجا، یه عنوان پی دکل های انتقال برق، طی سالیان با استفاده از مدل های فیزیکی و با مقیاس های مختلف، مطالعه شده است. از آنجا که باربری کششی این پی ها در مقابل نیروهای رو به بالا در دکل های انتقال بحرانی است، از مقاومت نوک صرفنظر خواهد شد و فقط باربری جدار موجود است. نیروی باربری اصطکاکی جدار (Q) را در خاک های ماسه ای و بدون چسبندگی می توان تابع قطر شمع (B)، وزن مخصوص موثر خاک (γ)، ضریب رانش افقی خاک (K)، زاویه اصطکاک داخلی موثر خاک (ϕ) و عمق شمع در خاک (D) دانست. اگر معادله حاکم بر سیستم f باشد.

$$f(Q, B, \gamma, K, \phi, D)=0$$

همانطور که قبل از این گفته شد، نیازی به دانستن رابطه ریاضی f نداریم، ولی در این مسئله رابطه f را می توان با استفاده از روابط متداول ظرفیت باربری شمع ها به شرح زیر تعیین کنیم.

$$Q=(\pi BD)(K\ \gamma\ D.\tan\phi)/2$$

$$Q-\frac{1}{2}(\pi\ B\ \gamma\ k\tan\phi\ D^2)=0$$

رابطه بالا در واقع همان معادله f است و در تحلیل ابعادی در انتخاب متغیر بی بعد کمک می کند.

در مسائل ژئوتکنیکی که تابع زمان نیستند، اغلب دو دیمانسیون نیرو (F) و طول (L) در مسئله وجود دارند. یعنی اگر m پارامتر مستقل (a_i) در مسئله باشد، آنگاه به تعداد m−۲ متغیر بدون بعد (π_i) می توان ارائه کرد. این قاعده ساده را در اغلب مدل های ژئوتکنیکی می توان به کار بست. البته در مدل های دینامیکی، دیمانسیون زمان (T) هم وارد می شود و تعداد متغیرهای بدون بعد فرق می کند. در مثال ذکر شده، برای باربری جدار شمع ۶ متغیر مستقل برای f فرض شده است، بنابراین سیستم را می توان به صورت تابع ۴ متغیر بدون بعد بیان کرد.

تعریف تعداد زیادی متغیرهای بدون بعد، با ترکیب های مختلف متغیرهای Q، B، γ، K، ϕ و D در این مسئله ممکن است. محققان در اینجا عمق شمع (D) و وزن مخصوص موثر خاک (γ) را به عنوان دو متغیر با دیمانسیون مستقل انتخاب کردند، که شامل هر دو دیمانسیون موجود در مسئله، یعنی نیرو و طول خواهد بود. آنگاه با ترکیب D و γ با سایر متغیرها می توان ۴ متغیر بدون بعد به شرح ذیل تعریف کرد.

$$\pi_1 = \frac{Q}{\gamma D^3}$$

$$\pi_2 = \frac{D}{B}$$

$\pi_3 = K$

$\pi_4 = tan\emptyset$

متغیرهای اول و دوم براساس روش متداول و به ترتیب از ترکیب با Q و B به دست آمده اند. ولی در این مسئله متغیرهای K و $\tan\phi$ اساساً بی بعد و مستقل هستند. بنابراین نیازی به ترکیب برای تعریف آنها نبوده و به عنوان متغیرهای π_i نیز قابل ارائه اند.

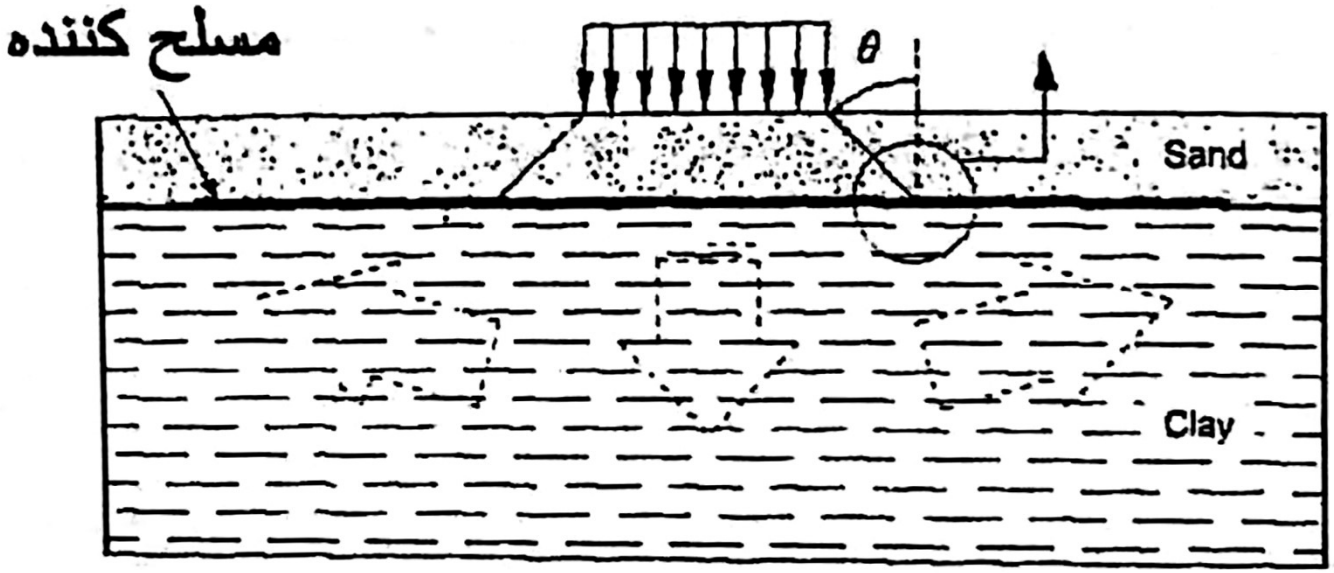
متغیر π_1 در این مسئله $(\frac{Q}{\gamma D^3})$ را می توان ظرفیت باربری بدون بعد نامید و باید داشته باشیم:

$$(\frac{Q}{\gamma D^3})_{\text{مدل}} = (\frac{Q}{\gamma D^3})_{\text{واقعیت}}$$

تعداد زیادی آزمایش کشش روی شمع ها در مدل های فیزیکی انجام شد و رابطه فوق برای ارتباط نتایج مدل به واقعیت به کار رفت. در ضمن این رابطه نشان داد که در مدل های با مقیاس خیلی کوچک، تشابه لازم وجود ندارد و نمی توان از نتایج مدل های خیلی کوچک استفاده کرد.

مثال باربری یک لایه ماسه و ژئوسینتتیک بر روی رس بسیار نرم

رس های بسیار نرم باربری بسیار اندکی دارند و حتی امکان تردد بر روی آنها برای ماشین آلات ساختمانی وجود ندارد. یک روش سریع برای بهبود باربری رس نرم این است که مثل شکل یک لایه ژئوسینتتیک بر روی رس قرار گرفته و سپس یک لایه نازک ماسه بر روی آن اجرا شود.



ظرفیت باربری این سیستم سه لایه ای را می توان به صورت زیر ارائه کرد.

$f(q, B, D, a, S, R, C)=0$

f تابع حاکم بر سیستم، q ظرفیت باربری (kN/m^2)، B عرض پی (m)، D ضخامت لایه ماسه ای (m)، a اندازه سوراخهای ژئوسینتتیک (m)، S سختی ژئوسینتتیک در کشش برای واحد عرض (kN/m)، R سختی خمشی ژئوسینتتیک برای واحد عرض (kN.m)، C مقاومت برشی رس (kN/m^2).

حالا رابطه به صورت تابعی از متغیرهای بدون بعد نوشته می شود. اگرچه متغیرهای بدون بعد را به صورت های مختلف می توان تعریف کرد، توجه به شناخت فیزیکی از مسئله به محقق کمک می کند تا متغیرهای مناسب تری انتخاب کند.

$$g[(\frac{D}{B}), (\frac{a}{B}), (\frac{qB^3}{R}), (\frac{R}{SB^3}), (\frac{q}{C})]=0$$

نخست توجه کنید که نیازی به دانستن شکل ریاضی تابع g وجود ندارد. دوم اینکه محققان مختلف ممکن است متغیرهای بی بعد گوناگونی را در رابطه فوق به کار ببرند.

اگر مقیاس هندسی مدل $\frac{1}{N}$ باشد آنگاه ابعاد هندسی مدل فیزیکی N بار کوچکتر از واقعیت خواهد بود، یعنی در این مسئله داریم:

$$\frac{B_p}{B_m}=\frac{D_p}{D_m}=\frac{a_p}{a_m}=N$$

زیرنویس p نشان دهنده نمونه واقعی (Prototype) و زیرنویس m به معنای مدل (Model) است.

قاعده ساده ذکر شده در رابطه فوق برای نسبت ابعاد هندسی نمونه واقعی و مدل، در خصوص متغیرهایی مثل سختی کششی و برشی ژئوسینتتیک صادق نیست. یعنی نمی توان سختی ژئوسینتتیک مورد استفاده در مدل را N برابر کوچکتر از سختی ژئوسینتتیک واقعی، در نظر گرفت. برای تعیین سختی در مدل باید از تحلیل ابعادی و تساوی متغیرهای بدون بعد در مدل و واقعیت استفاده کرد. سختی کششی و خمشی برای یک میله فولادی به ترتیب برابر با EA و EI است. مساحت و ممان اینرسی مقطع میله، به ترتیب با A و I نشان داده شده و E مدول یانگ است. سختی ژئوسینتتیک اغلب برای واحد عرض بیان می شود و واحد آن برای کشش و خمش

به عنوان مثال به ترتیب (kN/m) و (kN.m) است. بر خلاف برخی اشتباهات که در بعضی از پژوهش ها به چشم می خورد، باید سختی همه اجزای انعطاف پذیر و مسلح کننده را در تمام مدل های فیزیکی کاهش داد. این موضوع شامل شمع ها و پی های انعطاف پذیر و ژئوسینتتیک ها می شود. در این مثال متغیر بدون بعد π_3 را در تابع g در نظر می گیریم.

$$(\pi_3)_m=(\pi_3)_p$$

$$(\frac{qB^3}{R})_m=(\frac{qB^3}{R})_p$$

اگر طراحی مدل به گونه ای بود که تنش وارد بر سطح (q) در مدل و واقعیت یکسان باشد، آنگاه ظرفیت باربری (q) در مدل و واقعیت مساوی است و داریم:

$$\frac{R_p}{R_m}=(\frac{B_p}{B_m})^3.1=N^3$$

یعنی سختی خمشی ژئوسینتتیک مورد استفاده در مدل باید N^3 برابر کمتر از ژئوسینتتیک واقعی باشد. یعنی فقط در این صورت است که ظرفیت باربری اندازه گیری شده در مدل فیزیکی، با ظرفیت باربری واقعی برابر فرض می شود.

اگر متغیر π_4 را در تابع g در این مثال در نظر بگیریم، سختی کششی ژئوسینتتیک در مدل تعیین می شود.

$$(\frac{R}{SB^3})_m=(\frac{R}{SB^3})_p$$

$$\frac{S_p}{S_m}=(\frac{B_p}{B_m})^3.\frac{R_p}{R_m}=1$$

یافتن ژئوسینتتیک با سختی مورد نظر و کاهش یافته، در عمل بسیار مشکل است. زیرا کارخانجات تولید کننده، مصالح با سختی مورد نظر محقق را برای استفاده در مدل فیزیکی تولید نمی کنند. بنابراین راه حل مناسب این است که مصالح با سختی کم و در دسترس به کار رفته و سپس آنالیز ابعادی برای تفسیر نتایج مدل استفاده شود.

کاربردهای تحلیل ابعادی

تاکنون مبانی و روش ساده انجام تحلیل ابعادی ذکر شد. در اینجا به کاربردهای اصلی تحلیل ابعادی در تحقیق با مدل های فیزیکی اشاره می شود.

الف) تعیین قانون تشابه

متغیرهای بدون بعد در مدل و واقعیت باید مساوی باشند. با استفاده از این قاعده می توان تعیین کرد که مقادیر متغیرهای مختلف در مدل، باید چه نسبتی با واقعیت داشته باشند. برای مثال ذکر شد که سختی ژئوسینتتیک درمدل، باید کوچکتر از سختی ژئوسینتتیک واقعی باشد.

گاهی یک مدل فیزیکی از دیدگاه نظری به خوبی مقیاس نشده است. در این شرایط می توان با استفاده از قانون های تشابه گفت که نتایج مورد نظر مشابه چه شرایط واقعی است.

فرض کنید که قصد مطالعه یک سازه بنایی یک طبقه با جزئیات تاسیساتی همچون لوله های گاز را تحت زلزله با استفاده از میز لرزه داریم. اغلب ارتعاش میز لرزه از نظر دامنه ارتعاش کمتر از زلزله واقعی است. بنابراین در این شرایط دو راه حل برای مدلسازی وجود دارد. در راه اول ساختمان را با سختی های کاهش یافته می سازیم. در این حالت اجرای جزئیات بویژه جزئیات تاسیساتی مثل لوله های گاز مشکل می شود. در راه حل دوم سازه با مقیاس واقعی ساخته می شود، ولی آنالیز ابعادی به کار می رود تا مشخص شود که زلزله اعمال شده معادل چه زلزله کوچکی در واقعیت است.

ب) کاهش متغیرهای تحلیل

قبل از این ذکر شد که تعداد متغیرهای بدون بعد در تحلیل یک سیستم، کمتر از تعداد متغیرهای مستقل دارای بعد است. کاهش تعداد متغیرهای تحلیل کمک زیادی به محقق می کند. فرض کنید تعداد متغیرهای مستقل دارای بعد در یک مسئله ژئوتکنیکی ۵ عدد باشد. کشف ارتباط ۵ متغیر با هم بسیار مشکل است، ولی با تحلیل ابعادی یک مسئله ژئوتکنیکی که دارای ۲ دیمانسیون است، می توان تحلیل را بر روی ۳ متغیر بدون بعد مستقل انجام داد. در این شرایط روش های مختلف برازش خط یا منحنی (regration) و نظایر آن، به سادگی برای ارتباط دادن داده های ۳ متغیر و کشف رابطه آنها قابل استفاده است. از این خاصیت تحلیل ابعادی می توان برای تحلیل نتایج، حتی در مدل سازی های عددی یا مطالعه نمونه های آزمایشگاهی، استفاده کرد.

مقیاس های غیرهندسی

علاوه بر کوچک کردن ابعاد هندسی مدل می توان وزن مخصوص خاک، وزن مخصوص آب حفره ای و همچنین کرنش یا تغییر شکل نسبی را کاهش داد. تاکنون، فقط مقیاس کردن ابعاد هندسی مدل را ذکر کردیم. برای مثال وقتی که گفته می شود مقیاس یک مدل $\frac{1}{25}$ است یعنی ابعاد هندسی مدل ۲۵ برابر کوچکتر از واقعیت خواهد بود، اما باید توجه داشت که این روش تنها قابل استفاده برای مدل سازی نیست.

برای مطالعه یک پدیده واقعی با مدل فیزیکی، لازم است قانون تشابه معلوم شود. یعنی مشخص باشد که چه رابطه ای بین هر متغیر در مدل فیزیکی با مقدار آن متغیر در واقعیت وجود دارد. فرض کنید که قصد مطالعه یک پی سطحی را داریم و مقیاس هندسی مدل $\frac{1}{N}$ است. می توانیم تنش، کرنش، تغییر مکان و زمان در مدل را هم به ترتیب با مقیاس N_s، N_ε، N_d و N_t کوچک کنیم. آنگاه رابطه تنش (σ)، کرنش (ε)، تغییرمکان (δ) و زمان (t) در مدل (با اندیس m) و واقعیت (با اندیس p) به صورت زیر در می آید:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_p}=\frac{1}{N_S}$$

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p}=\frac{1}{N_\varepsilon}$$

$$\frac{\delta_m}{\delta_p}=\frac{1}{N_d}$$

$$\frac{t_m}{t_p}=\frac{1}{N_t}$$

در برخی از مدل های فیزیکی خاص ممکن است مسائلی مثل پیچیدگی های اجرایی و محدودیت ابزار آزمایشگاهی موجب شوند تا محقق علاوه بر مقیاس هندسی، از مقیاس های غیر هندسی بالا هم استفاده کند. البته در این صورت تفسیر نتایج مدل، باید آگاهانه با توجه به کلیه مقیاس ها انجام شود. برای مثال تغییر مکان $\frac{1}{N_d}$ به ازای تغییر مکان های کوچک برابر با حاصلضرب مقیاس هندسی در مقیاس کرنش $\frac{1}{N.N_\varepsilon}$ می شود. این تساوی در تغییر شکل های بزرگ وقتی صادق است، که مقیاس کرنش برابر با یک باشد. یعنی آنچه را که به عنوان کرنش در مدل اندازه می گیریم، برابر با کرنش واقعی باشد.

وقتی از مقیاس های غیر هندسی استفاده می شود، محاسبه تمامی متغیرها در مدل و واقعیت باید با توجه به تمام مقیاس ها انجام شود. برای مثال معادلات بالا برای تشابه می گویند که در مدل فیزیکی باید تنش σ_m به مدت زمان t_m از پی بر زمین وارد شود. بر این اساس می توان به دست آورد که اگر پی سطحی یک نیروی متمرکز F وارد کند، رابطه نیرو در مدل و واقعیت به صورت زیر است.

$$\frac{F_m}{F_p}=\frac{1}{N^2.N_s}$$

مقیاس کردن ابعاد دانه های خاک نوعی مقیاس هندسی است، ولی فقط وقتی ضرورت دارد که تعداد محدودی دانه مطالعه شوند.

قانون های عمومی تشابه

ایایی (Iai, 1989) به سبب مقالاتش در مورد تعیین قانون تشابه و مدل های فیزیکی و واقعیت از نام آوران است. وی در اولین مقاله خود در خصوص این موضوع با نوشتن معادلات تعادل، توانست ضرایب مقیاس را بدست آورد. مقاله جدیدتر ایایی به بررسی عمیق تر اندرکنش خاک و سازه در مدل های میز لرزه پرداخته و نتایج کامل تری را ارائه کرد.

به طور معمول دانسیته و کرنش خاک در مدل و واقعیت یکسان فرض می شود (D=e=1). بنابراین روابط جدول بعد خیلی ساده خواهند شد. سختی خمشی و محوری اجزا در مدل کمتر از سختی مشابه در واقعیت است. یعنی اجزای ضعیف تری در مدل به کار می بریم.

مقیاس (نسبت واقعیت به مدل)	متغیر
N	طول
D	دانسیتهٔ خاک اشباع
e	کرنش خاک
$(Ne)^{0.5}$	زمان
$(Ne)^{-0.5}$	فرکانس
1	شتاب
$(Ne)^{0.5}$	سرعت
Ne	تغییر مکان
ND	تنش کل و مؤثر
ND/e	سختی
$(Ne)^{0.5}/D$	نفوذپذیری
ND	فشار آب
D	دانسیته آب
N^5D/e	سختی خمشی (EI)
N^3D/e	سختی محوری (EA)
N^4D	لنگر
N^3D	نیروی برش
N^3D	نیروی محوری
N^2D	نیروی محوری بر واحد عرض
e	زاویهٔ شیب پی یا تیر در مرز
N^4D/e	سختی خمشی در واحد عرض

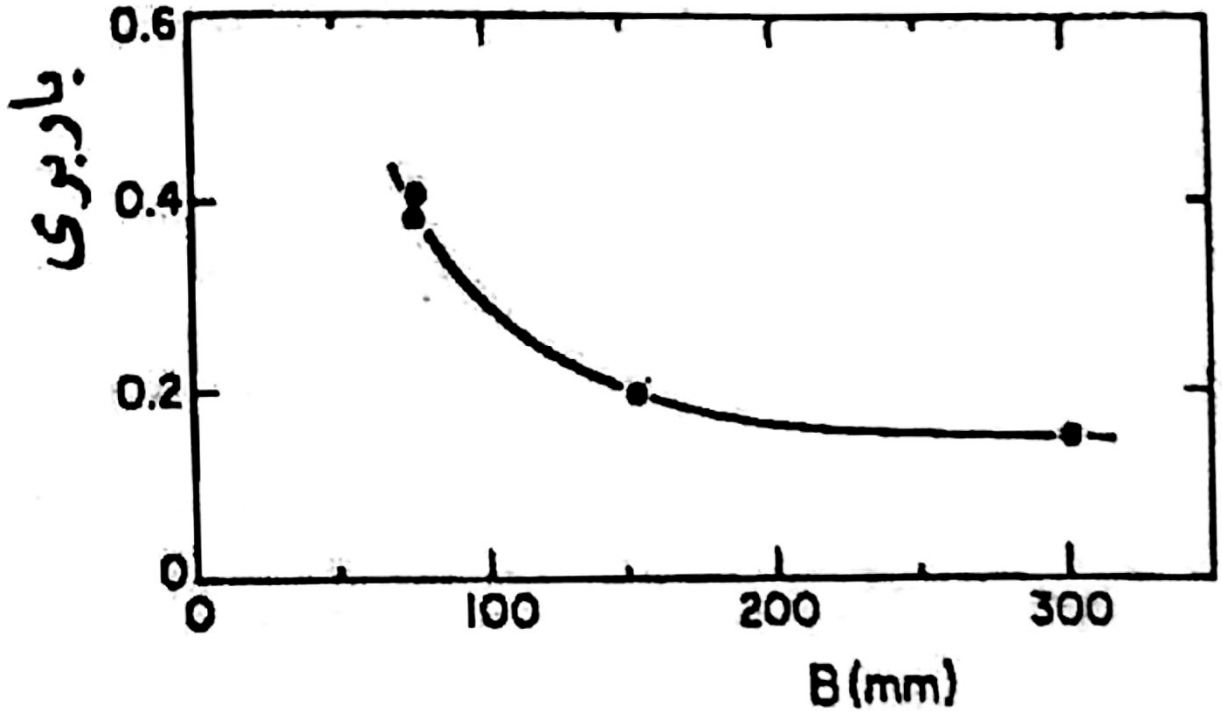
اثر مقیاس– تشریح فیزیکی

اگر یک خاکریز سنگریزه ای را به طور کامل با مقیاس $\frac{1}{N}$ مدل کنیم، ابعاد قلوه سنگ های نمونه واقعی به اندازه N برابر کوچک شده و در مدل فیزیکی به کار می رود. آن گاه در اثر ریزدانه شدن سنگدانه ممکن است رفتار توده خاکی از حالت دانه ای و با زهکشی آزاد به رفتار زهکشی نشده تبدیل شود. عدم زهکشی موجب افزایش فشار آب حفره ای خاکریز در اثر بارگذاری سریع و تغییر رفتار مدل خواهد شد.

البته کوچک کردن دانه های خاکی در تمام مدل های فیزیکی متداول نیست.

به طور معمول در مدل های فیزیکی سازه های خاکی گفته می شود که در سطوح تماس خاک و سازه یا سطوح تماس لایه های خاک و همچنین مرزهای مدل، باید بی نهایت دانه خاکی داشته باشیم. بنابراین کوچک کردن دانه ها در مدل های خاک متداول نیست، زیرا تعداد دانه های خاکی در سطوح تماس آنقدر زیاد است، که می توان آنها را بی نهایت فرض کرد. ولی در توده های خرده سنگی بی نهایت دانه در سطوح تماس نداریم و تعداد محدودی دانه در این سطوح وجود دارد، پس کوچک کردن دانه ها لازم است.

اثر مقیاس در مدلسازی پی های سطحی نیز وجود دارد. وقتی اندازه مدل یک پی سطحی عوض می شود، ظرفیت باربری آن تغییر خواهد کرد. اگر چه دلایل مختلفی برای بروز اثر مقیاس در مدل سازی پی های سطحی وجود دارد، ولی یکی از دلایل اصلی آن وقتی خیلی کوچک می شود، ساز و کار گسیختگی آن تغییر می کند و اثر مقیاس به وجود می آید.



اثر مقیاس در عرض خط های گسیختگی زیر پی یا نوار برشی (shear band) نیز وجود دارد و تاثیر مقیاس بر عرض نوار برشی حتی در آزمون برش مستقیم مطالعه شده است. بنابراین طبیعی خواهد بود که در مدل های فیزیکی که تا حد گسیختگی پیش می روند، نیز اثر مقیاس وجود داشته باشد.

پدیده های فیزیکی مختلفی موجب اثر مقیاس در مدل های فیزیکی می شوند. دلایل فیزیکی عمده وجود اثر مقیاس به شرح زیر می باشند:

(الف) متغیرهایی که تابع تنش همه جانبه اند (مثل Ø، E و G در ماسه ها).

(ب) پدیده هایی که بار محرک تابع جاذبه است (مثل شرایط بروز ترک کششی در رس های مجاور یک شیب تند).

(ج) خصوصیات خط گسیختگی و همچنین گسیختگی پیش رونده نیز موجب اثر مقیاس می شود، زیرا علاوه بر عرض خط گسیختگی که می تواند تابع مقیاس باشد، مقدار تغییر مکان لازم برای بروز مقاومت نهایی نیز به دلیل گسیختگی پیش رونده، تابع مقیاس می شود. برای مثال تغییر مکان لازم برای بسیج حداکثر باربری جدار شمع، تابع اثر مقیاس در مدل فیزیکی است. وقتی اندازه مدل تغییر می کند، تغییر مکان لازم برای گسیختگی هم فرق می کند.

یکی دیگر از مشکلات عدم تشابه مدل های فیزیکی و واقعیت، ناشی از این است که تغییر حجم یا اتساع خاک های دانه ای تابع تنش وارد بر آنها است. اتساع یا انقباض می تواند تاثیر زیادی بر ایجاد فشار آب حفره ای داشته باشد. برای ایجاد رابطه رفتاری مشابه واقعیت، گاهی لازم است که دانسیته ماسه در مدل کاهش داده شود تا با تنش کمتر، همان رابطه به دست آید.

مدل های سانتریفوژ، معایب (الف) و (ب) ذکر شده در قبل را تا حدودی رفع می کنند، ولی دلایل نوع (ج) در مدل های سانتریفوژ نیز وجود دارد.

اثر مقیاس– تشریح نظری

اثر مقیاس را می توان به صورت نظری با استفاده از تحلیل ابعادی تشریح کرد.

با توجه به روابط ارائه شده در تحلیل ابعادی می توان گفت که تمام متغیرهای π_i در مدل و واقعیت را نمی توان برابر کرد. به بیان دیگر نمی توان همواره مدل فیزیکی را چنان طراحی کرد که مقدار π_i در مدل، با مقدار آن در واقعیت یکسان باشد. در نتیجه اثر مقیاس به وجود می آید. چند دلیل برای عدم امکان ایجاد شرایطی برای تساوی تمام π_iها در مدل و واقعیت وجود دارند، عبارتند از:

(الف) عدم امکان به دست آوردن مصالح خاص در تمام شرایط: اگر با تحلیل ابعادی به اینجا برسیم که خاکی با E و $\emptyset$ مشخص در مدل فیزیکی مورد نیاز است. یافتن این خاک در عمل همواره مقدور نیست. همچنین اغلب مشکلاتی برای تهیه ژئوسینتتیک با خواص مورد نظر و سایر مصالح وجود دارد.

(ب) عدم شناخت کل عوامل موثر در مسئله: از آنجا که تمام عوامل موثر بر مسئله (a_i) را نمی شناسیم، نمی توانیم تمام متغیرهای بدون بعد یعنی π_iها را، تعیین کنیم.

(ج) مشکل ارضای همزمان تمام متغیرهای بی بعد: برخی اوقات تلاش برای ارضای تساوی یک متغیر بدون بعد در واقعیت و مدل موجب مخدوش شدن تساوی سایر متغیرهای بدون بعد می شود. بنابراین ارضای تساوی متغیرهای مدل و واقعیت برای تمام متغیرها، به صورت همزمان مشکل است.

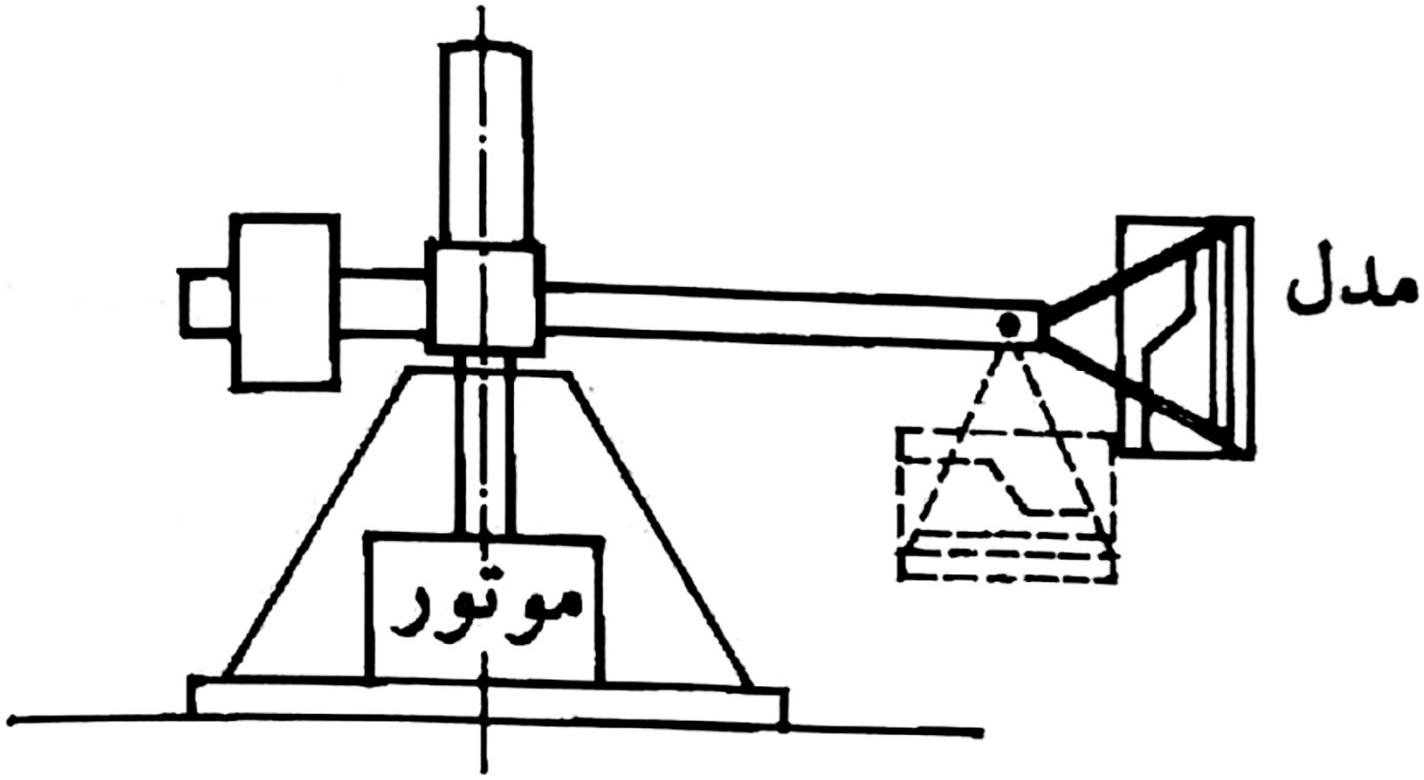
مقیاس مناسب

مقیاس مناسب مدل فیزیکی باید چنان تعیین شود که نخست، مدل خیلی بزرگ نباشد تا کار کردن با آن سخت شود و دوم مدل باید خیلی کوچک نباشد تا اثر مقیاس موجب تفاوت رفتار مدل و نمونه واقعی شود. بنابراین انتخاب مقیاس مناسب اهمیت زیادی دارد.

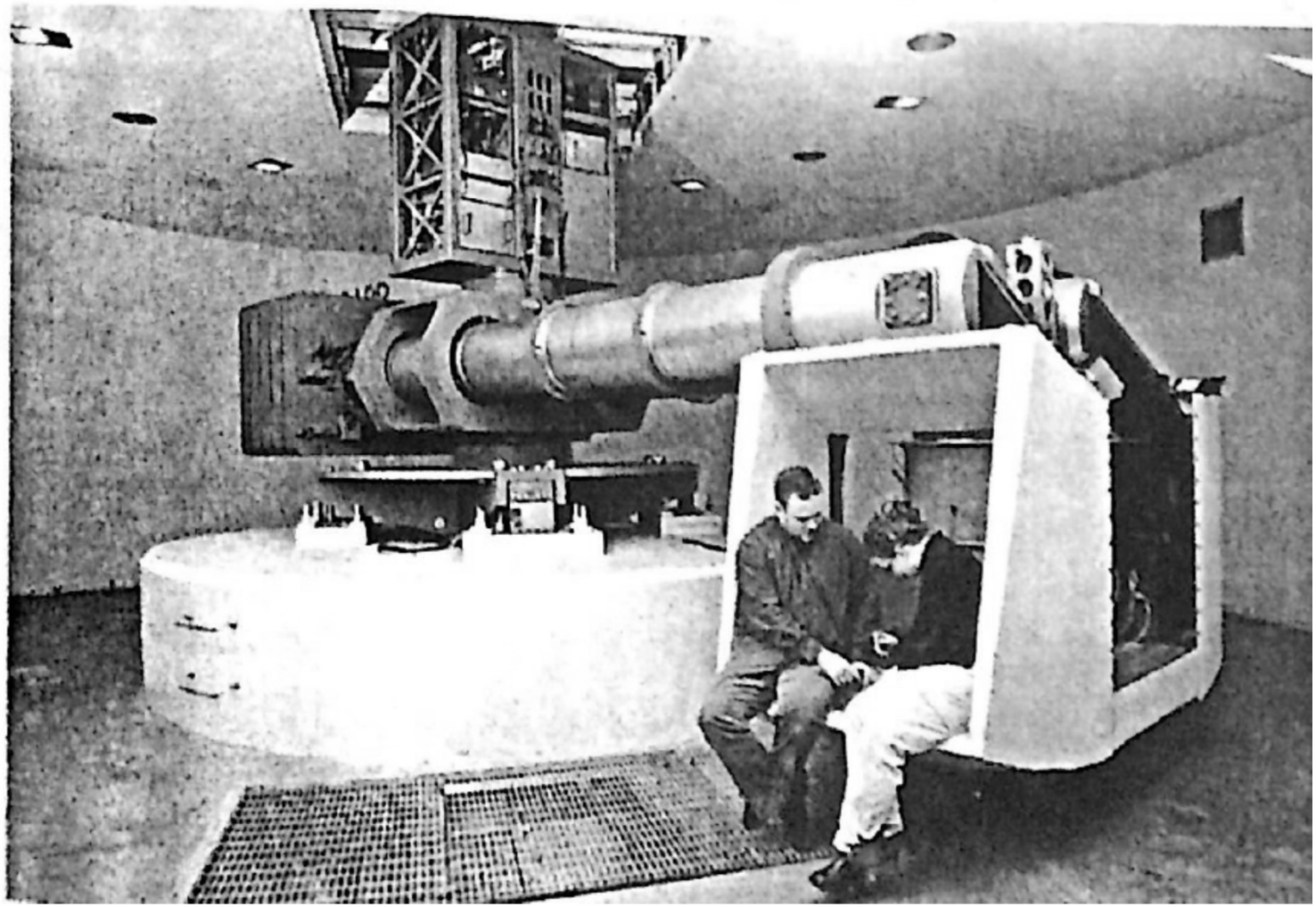
حتی برخی محققان، مدل های فیزیکی با مقیاس های متفاوت ساخته اند تا تاثیر مقیاس مدل را بر نتایج مطالعه کنند. بنابراین انجام آن بندرت مقدور است، ولی با کمک آن می توان تشخیص داد که بزرگ شدن مقیاس از یک حد خاص به بعد، اثری روی مقدار نتایج ندارد.

مدل های سانتریفوژ

مدل سانتریفوژ در واقع ابزاری برای افزایش مقدار تنش وزنی در مدل فیزیکی است. این کار با گردش سبد یا محفظه کوچک حاوی مدل فیزیکی حول محور قائم و با شتاب گریز از مرکز انجام می شود. شکل زیر طرح شماتیک را نشان می دهد.



شکل زیر طرح واقعی دستگاه را نشان می دهد.



شتاب گریز از مرکز در دستگاه سانتریفوژ در راستای افقی وارد می شود و از آنجا که چند برابر شتاب جاذبه است، در هندسه کوچک تر می توان در مدل فیزیکی مقدار تنش را مساوی تنش واقعی در طبیعت گرفت. فرض کنید دستگاه گریز از مرکز شتاب 100g را اعمال می کند. بنابراین تنش وزنی در عمق یک متری از مدل فیزیکی برابر با تنش وزنی در عمق ۱۰۰ متری شرایط واقعی است. با این روش تنش وزنی در مدل و واقعیت یکسان می شود و فقط راستای آنها فرق می کند. البته نیروی قائم وزن در هنگام پرواز سبد حاوی مدل فیزیکی وجود دارد، ولی مقدار آن در مقایسه با نیروی افقی گریز از مرکز، اندک است. ناگفته نماند که نسبت تنش های افقی و قائم در حالت سکون در واقعیت و مدل سانتریفوژ می تواند متفاوت باشد.

گاهی این پرسش مطرح می شود که در چه شرایطی برای مدلسازی مسائل ژئوتکنیکی به مدل سانتریفوژ نیاز داریم و می توان مدل 1g را با موفقیت بکار برد. در صورت فراهم بودن امکانات لازم، استفاده از مدل فیزیکی با مقیاس بزرگ می تواند یک راه حل باشد، ولی اگر سطح تنش های وزنی در خاک بزرگ نباشد، می توان از مدل 1g با مقیاس کوچک استفاده کرد.

در بعضی شرایط پدیده یا متغیر تابع تنش نداریم. برای مثال ظرفیت باربری رس های عادی تحکیم یافته از این قبیل مسائل است و می توان از مدل های 1g برای مدل سازی آنها استفاده کرد. در مقابل باید توجه داشت که پایداری شیروانی در خاک های رسی برخلاف ظرفیت باربری یکی از دسته مسائلی است که با سانتریفوژ مطالعه می شود. روش مطالعه پایداری شیروانی ها با مدل های سانتریفوژ این استکه سرعت پرواز مدل و شتاب گریز از مرکز وارد به آن به صورت پله ای افزایش داده می شود تا نیروی ثقلی نیز افزایش پیدا کند.

دستگاه سانتریفوژ

دستگاه سانتریفوژ شامل موتور دوران، بازوی دوران و همچنین یک محفظه کوچک یا سبد حاوی مدل فیزیکی است. در ضمن ابزار کنترل و اندازه گیری در دستگاه سانتریفوژ وجود دارد. سیستم اندازه گیری و کنترل باید قادر باشد که حین پرواز سبد حاوی مدل فیزیکی عملیات لازم را در درون مخزن خاک انجام دهد.

هر مدل فیزیکی در سبد یا محفظه کوچکی در انتهای بازوی سانتریفوژ نصب می شود. مدل فیزیکی در پایان هر آزمایش تعویض خواهد شد، ولی بخش اصلی دستگاه سانتریفوژ در اتاقکی بزرگ به صورت دائمی نصب می شود. این اتاقک استوانه ای فضای به نسبت بزرگی را به خود اختصاص می دهد. فاصله محفظه کوچک، یا سبد حاوی مدل در حین پرواز با دیوار داخلی اتاقک بزرگ، مهم است و باید در محیط اتاقک بزرگ ثابت باشد. کم یا زیاد شدن این فاصله، موجب افزایش مشکلات مربوط به کنترل یکنواختی سرعت پرواز سبد و مقدار نیروی گریز از مرکز می شود.

ظرفیت دستگاه های سانتریفوژ اغلب به صورت حاصلضرب شتاب در وزن قابل حمل بیان می شود. اگر دستگاهی قادر باشد که وزن ۰/۵ تن را به شتاب ۲۰۰g برساند، ظرفیت آن g.Ton ۱۰۰ است. طول بازو هم اهمیت دارد. ارتفاع مدل فیزیکی نباید نسبت به طول بازوی دستگاه سانتریفوژ، بزرگ باشد، تا از ایجاد شتاب غیر یکنواخت اجتناب شود. توجه کنید که شتاب گریز از مرکز در طول بازوی دوران فرق می کند. ارتفاع مدل فیزیکی در هنگام پرواز در راستای افقی و در امتداد بازوی دستگاه سانتریفوژ، قرار می گیرد، بنابراین در هر صورت مقداری از غیر یکنواختی شتاب اجتناب ناپذیر است.

ابزار بارگذاری

بارگذاری به معنای عام شامل اعمال شرایط مختلف مثل لرزش، افزایش فشار آب، افزایش دما و نظایر آن در مدل سانتریفوژ، بسیار سخت تر از مدل های فیزیکی معمولی است، زیرا بارگذاری در مدل های سانتریفوژ در شرایطی صورت می گیرد که مدل فیزیکی در سبد در حال پرواز و تحت نیروی گریز از مرکز قرار داشته و دسترسی به مدل در حین آزمایش وجود ندارد.

روش ها و ابزار مختلفی برای بارگذاری در مدل های سانتریفوژ وجود دارد که در اینجا به برخی از آنها اشاره می شود:

- میله های بارگذاری برای اعمال بار در مدل های سانتریفوژ در حین پرواز، به کار می روند. برای مثال در مدل ظرفیت باربری پی های سطحی باید از یک میله بارگذاری استفاده کرد. این میله ها با کنترل خودکار از راه دور کار می کنند و در هنگام پرواز می توان دستورات لازم را به آن ها داد.
- اعمال ضربه در مدل فیزیکی سانتریفوژ برای مطالعه پدیده هایی مثل تراکم دینامیکی نیاز به ابزار مناسب دارد. ویژگی اصلی ابزار اعمال ضربه در این نوع مدل ها آن است که باید ضربه را حین پرواز سبد اعمال کنند.

- میز لرزه نیز در مدل های سانتریفوژ استفاده می شود. سیستم کار، مشابه میز لرزه معمولی است و تفاوت در این خواهد بود که میز لرزه باید قابلیت نصب در سبد حاوی مدل را داشته باشد و تمام کنترل های آن از راه دور و در حال پرواز و تحت شتاب گریز از مرکز مقدور است.
- گرم کردن یک جزء خاص از مدل هم گاهی در هنگام پرواز مدل در درون سبد لازم است. لوله های نفت در بستر دریا مدفون می شوند و برای تسهیل انتقال نفت، ممکن است آن را گرم کنند. گرما می تواند موجب کمانش لوله به طرف بالا و راندن خاک روی لوله، به اطراف شود. مطالعه اندرکنش پیچیده لوله و خاک در اثر حرارت، با مدلسازی سانتریفوژ مقدور است.

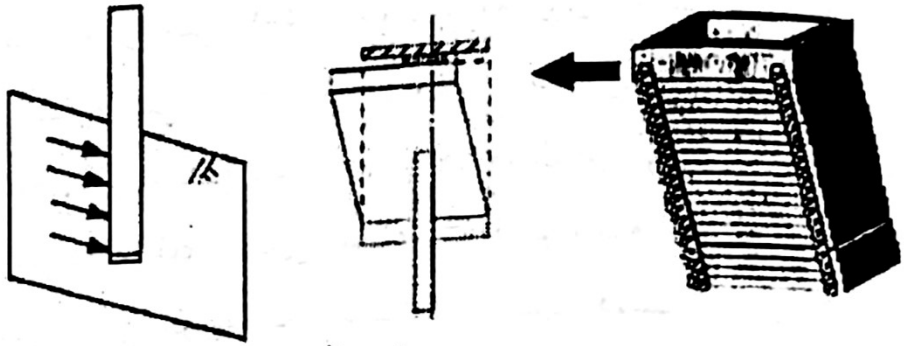
ارزیابی مدل های سانتریفوژ

به کارگیری مدل های سانتریفوژ در مسائلی ضروری است که پدیده حاکم، به شدت تابع جاذبه یا تنش وزنی باشد. برای مثال رفتار خاک های دانه ای تابع تنش همه جانبه است و اگر سطح تنش در مسئله ای بزرگ باشد، مدل 1g می توانند خطای بزرگی داشته باشند، زیرا در این مدل ها، تنش همه جانبه کوچکی ایجاد می شود. در این شرایط مدل های سانتریفوژ نسبت به مدل های معمولی اولویت دارند. همچنین گاهی بارگذاری به گونه ای است که تابع جاذبه خواهد بود. برای مثال مطالعه عمق ترک کششی در بالادست شیروانی های رسی، با استفاده از مدل های فیزیکی 1g مقدور نیست. همچنین ارتفاع حدی یک گود قائم در خاک رسی سخت را نمی توان بدون استفاده از سانتریفوژ مطالعه کرد، زیرا ارتفاع گود در مدل آنقدر کوچک است، که نمی تواند موجب گسیختگی شود.

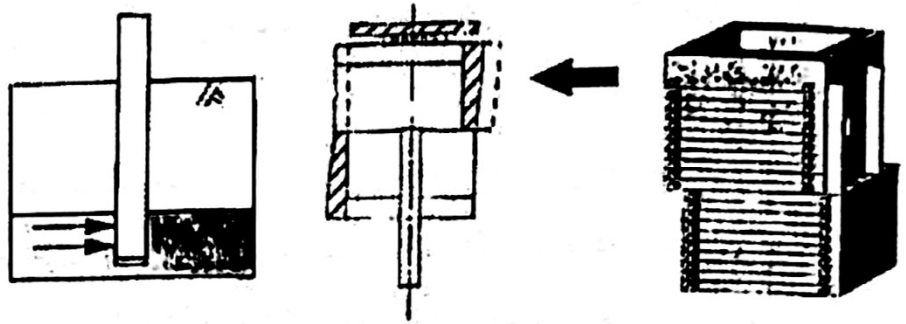
مدل های فیزیکی خاص

آنچه تاکنون برای مدل های 1g مطرح شد، در واقع در مورد متداولترین نوع مدل های فیزیکی بود. اما گاهی محقق می تواند به انواع ابتکاری روی آورد. برای مثال مدل های کف اصطکاکی (friction base) در مطالعات توده سنگی استفاده شده اند. در این مدل ها، توده سنگی به صورت ۲ بعدی با درز و ترک های لازم به وسیله روغن و چسب و آرد ساخته می شود و روی صفحه اصطکاکی افقی قرار می گیرند. توده سنگی دو بعدی است و در راستای افقی تحت بارگذاری در مدل واقع می شود. اصطکاک توده و صفحه اصطکاکی موجب مقاومت در برابر بار خواهد شد.

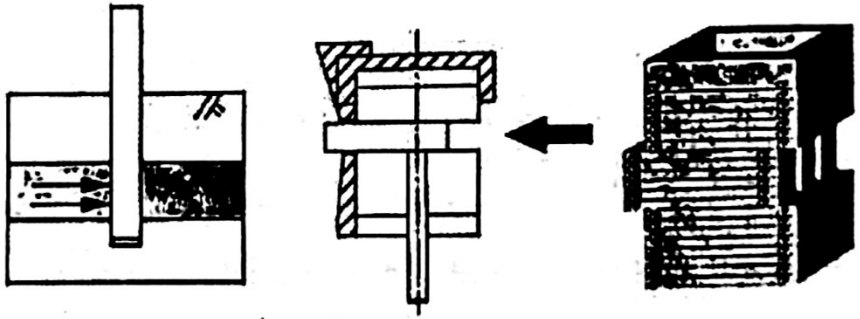
به عنوان مثالی دیگر از مدل های فیزیکی خاص و ابتکاری در ژئوتکنیک، می توان به مدل های خاص فشار جانبی خاک بر شمع اشاره کرد. دیواره مخزن خاک در این روش همچون مخزن لایه ای در مدل های دینامیکی ساخته می شود، سپس با حرکت نسبی لایه های مخزن، می توان فشار مورد نظر را از خاک بر شمع اعمال کرد. لایه ای بودن دیواره مخزن خاک موجب می شود که شکل ها مختلف مثل متوازی الاضلاع یا جعبه برش مستقیم به خود بگیرد. از آنجا که شمع دورن آن ثابت است، تنش های مورد نظر بر شمع اعمال می شود. برای مثال شکل بعد برای شبیه سازی خاک و شمع در شیروانی می باشد.



برش خالص



برش مستقیم



برش محدوده ای