

طراحی، ساخت و اجرای آزمون برجای اولین دیلاتومتر تیغه‌ای مجهز به سنسور الکترونیکی حساس به لرزش در خط ۶ مترو تهران

علی دادخواه تهرانی^۱؛ رضا شیرین‌آبادی^{۲*}؛

۱- ارشد مکانیک سنگ، گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- مرکز تحقیقات مدل‌سازی و بهینه‌سازی در علوم و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

چکیده

آزمون دیلاتومتری جزء آزمون‌های برجای ژئوتکنیک و مکانیک سنگ است که ۴۵ سال پیش در اروپا و سپس در آمریکا معرفی شد. این دستگاه از زمان اختراع تاکنون، بنا به نیازهای گوناگون در پروژه‌ها تغییراتی داشته و مجهزتر شده است. افزودن ژئوفون جهت محاسبه سرعت موج برشی خاک یکی از این موارد بود. در این پروژه سعی شده تا بجای ژئوفون بعنوان یک قطعه الکترونیکی، از سنسور الکترونیکی حساس به لرزش با عمر زیاد، هزینه پایین‌تر و ابعاد کوچکتر استفاده شود. بررسی امکان دریافت سرعت موج برشی خاک (V_s) و همچنین دستیابی به مدول برشی حداکثر خاک (G)، از دیگر اهداف این پروژه بود. طراحی تیغه و راد توسط نرم افزار *AutoCAD 3D* و تراشکاری با دستگاه *CNC* انجام شد. طراحی برد درایور با نرم افزار *Fritzing* و ساخت *PCB* بصورت دستی انجام و سپس قطعات الکترونیکی مونتاژ شدند. پس از اتمام طراحی و ساخت دیلاتومتر، آزمون برجا در ایستگاه درحال ساخت بهارشیراز در خط ۶ مترو تهران انجام شد. نتایج دستگاه ساخته شده نشان داد که امکان اندازه‌گیری پارامترهای خاک وجود دارد. سرعت موج برشی خاک $V_s=504.5$ متر بر ثانیه و مدول برشی حداکثر $G_0=4.33$ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور ارزیابی بهتر نتایج دستگاه، اجرای آزمون مقایسه‌ای پیشنهاد می‌شود.

دیلاتومتر تیغه‌ای، سنسور *80I-S*، سرعت موج برشی، آزمون برجا، ژئوتکنیک، مکانیک سنگ، *SDMT*

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

بسیاری از پارامترهای دیگر خاک، همگی با اجرای این آزمون‌ها به دست می‌آیند. آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. از مزایای آزمون‌های آزمایشگاهی می‌توان به کنترل شرایط زهکشی و کنترل مسیر تنش اشاره کرد. آزمون‌های آزمایشگاهی، معایبی نیز از قبیل دست‌خوردگی خاک هنگام تهیه نمونه، حمل تا آزمایشگاه و قرار دادن آن در دستگاه، صرف وقت و هزینه بالاتر نسبت به روش‌های برجا دارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که یکی از دلایل محبوبیت امروزی آزمون‌های برجا، عدم نیاز به حمل نمونه و دست‌خوردگی خاک و اجرا با صرف هزینه و زمان کمتر نسبت به آزمون‌های آزمایشگاهی است. تحلیل نتایج آزمون‌های

شناسایی رفتار خاک و سنگ به عنوان پایه و اساس طراحی و اجرای پروژه‌های عظیم معدنی و عمرانی از قبیل تونل‌های شهری و بین شهری، فرودگاه‌ها، آسمان‌خراش‌ها، سازه‌های تخصصی سد، نیروگاه‌های آبی و طرح‌های آبرسانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دسترسی به مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک و سنگ با انجام آزمون‌های صحرائی یا برجا و آزمون‌های آزمایشگاهی حاصل شده و در اختیار طراح پروژه قرار می‌گیرد. برآورد ظرفیت باربری فونداسیون و تعیین ضرایب مربوطه، زاویه اصطکاک داخلی موثر، مدول الاستیسیته، وزن مخصوص خاک، پیش‌بینی میزان نشست زمین و

* نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
پست الکترونیک: Re.Shirinabadi@gmail.com و R.Shirinabadi@azad.ac.ir

طراحی و ساخت آن نیز اقدام گردد. همچنین با تحقیقات به عمل آمده تلاش شد تا ضمن کاهش هزینه تولید و افزایش عمر و بالابردن حساسیت سنسور، نسبت به ابداع نسل جدیدی از این ابزار اقدام شود. از این رو پس از انجام مطالعات فراوان در خصوص مشخصات فنی تعدادی از سنسورهای حساس به لرزش موجود در بازار از قبیل پیزوالکتریک‌ها و سنسورهای وزنه‌ای و غیره در نهایت سنسور $80I-S$ برای استفاده در این دستگاه انتخاب شد؛ و پس از نصب بر روی راد دیلاتومتر، کارایی آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. اندازه‌گیری سرعت موج برشی در خاک و تعیین مدول برشی خاک نیز از دیگر اهداف ساخت دستگاه دیلاتومتر تیغه‌ای مجهز به سنسور حساس به لرزش الکترونیکی بود.

۳- تاریخچه دیلاتومتر

دستگاه دیلاتومتر تیغه‌ای و تست دیلاتومتری برای نخستین بار در سال ۱۹۷۴ در دانشگاه لاکوئیل^۵ ایتالیا توسط پروفیسور سیلوانو مارچتی^۶ معرفی شد. این دستگاه به منظور اندازه‌گیری واکنش خاک نسبت به نیروی وارده از طرف تیغه توسط ایشان طراحی و ساخته شد. هدف اصلی از طراحی آن به دست آوردن مقدار بارگذاری جانبی شمع‌ها در طراحی سازه بوده است. کلیه مراحل طراحی و ساخت نیز طی متنی در بخش دهم در نهمین انجمن بین‌المللی مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک که در سال ۱۹۷۷ در توکیو برگزار شد، ارائه گردید [۲]. تا سال‌ها پس از این دستیابی، بسیاری از تحقیقات و نتایج حاصل از استفاده از دیلاتومتر، صرف ارزیابی و طراحی پارامترهایی از قبیل M ، S_{II} و OCR شد. ۱۵ سال بعد از معرفی اولین نمونه، رابرتسون^۷ و همکاران در ۱۹۸۷ و مارچتی و همکاران در ۱۹۹۱ هر کدام طراحی جداگانه برای محاسبه فشار جانبی ناشی از بارگذاری شمع‌ها ارائه کردند که این متدها باعث توسعه و گسترش استفاده از این دستگاه شد؛ و امروزه از هر دو روش در پیش‌بینی فشار جانبی شمع‌های بارگذاری شده استفاده می‌شود. بنابر ادعای پروفیسور مارچتی، دیلاتومتر ابزاری است که توسط هر دو شخص فوق یعنی پروفیسور مارچتی و رابرتسون توسعه یافت و علاوه بر آن، امروزه جهت مقاصد استفاده می‌شود که هدف اولیه از ابداع آن نبوده است [۲]. (شکل ۱) اولین دیلاتومتر تیغه‌ای ساخته شده توسط پروفیسور مارچتی را نشان می‌دهد که به‌منظور اندازه‌گیری برجا مدول خاک مورد استفاده قرار گرفت. در نمونه اولیه، از دو دیافراگم با ورق مسی که در دو سمت تیغه از جنس استیل تعبیه شده بود استفاده شد. تیغه در قسمت پایین V شکل بوده و در بالا و محل اتصال به رادهای فشاری مقطعی مستطیل شکل داشته که اتصال و بستن آن

برجا عمدتاً بر اساس روابط تجربی خواهد بود. لذا تجربه و افزایش تعداد آزمایش‌ها نقش مهمی در تفسیر نتایج خواهد داشت. آزمون دیلاتومتری^۱ جزء آزمون‌های برجا در زمینه تخصصی مکانیک خاک و مکانیک سنگ است و با توجه به اینکه برای ورود تیغه به درون خاک نیاز به حفاری مجزایی نداشته و شکل تیغه به گونه‌ای است که کمترین میزان دست‌خوردگی و اغتشاش ناحیه‌ای در محل نفوذ به خاک را ایجاد می‌کند، نتایج قابل قبولی نیز ارائه می‌دهد.

از ابداع و معرفی دیلاتومتر تیغه‌ای (تخت) توسط مارچتی ۴۵ سال می‌گذرد. این دستگاه از زمان ابداع تاکنون، بنا به نیازهای متعدد در پروژه‌ها تغییراتی داشته و مجهزتر شده است. افزودن ژئوفون^۲ جهت محاسبه سرعت موج برشی V_s در زمین یکی از این موارد بوده که منجر به معرفی دستگاه $SDMT$ ^۴ شد.

۲- لزوم طراحی و ساخت دیلاتومتر حساس به لرزش

با سنسور الکترونیکی

پیشرفت تکنولوژی در عرصه‌های گوناگون از یک سو و تقاضا جهت بهبود و افزایش راندمان و کارایی ماشین‌آلات و ابزارها از سوی دیگر دنیای طراحی و ساخت را به سمت رقابتی شدن پیش برده است. ابزارآلات مهندسی نیز از این قاعده مستثنی نبوده و هرازگاهی خبر معرفی نسل جدیدی از ماشین‌آلات تخصصی و ابزارهای جدیدی منتشر می‌شود که با فن‌آوری روز درآمیخته شده و با قابلیت بیشتری به نسل بشر خدمت می‌کنند.

اگر چه نزدیک به نیم قرن از معرفی دیلاتومتر تیغه‌ای و ارائه خدمت به جامعه مهندسی در کشورهای پیشرفته گذشته؛ جامعه مهندسی عمران و معدن ایران با آن آشنایی کمتری دارد. بررسی مطالعات و سابقه استفاده از دیلاتومتر نشان می‌دهد که از این ابزار بیشتر در پروژه‌های سدسازی (سد جاوه، سد رودبار و سد جم‌شیر)، سایت نیروگاه آبی لوارک، نیروگاه آبی سیاه‌بیشه در طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ میلادی و به منظور تعیین مدول تغییر شکل سنگ-ها و بررسی ویژگی‌های ساختگاهی پروژه‌های مذکور استفاده شده است [۱]. البته شرکت‌های آزمایشگاهی و خدمات مهندسی ژئوتکنیک زیادی در وبسایت خود این ابزار را معرفی و روش کار و قابلیت‌های آن را تشریح کرده‌اند؛ ولی تا فراگیر شدن این ابزار و بهره‌مندی از قابلیت‌های فراوان آن در پروژه‌ها فاصله بسیاری وجود دارد. لذا با درک لزوم طراحی و ساخت اولین نمونه داخلی دیلاتومتر مجهز به سنسور حساس به لرزش، سعی شد تا علاوه بر معرفی بیشتر این ابزار به جامعه مهندسی کشور، نسبت به بومی‌سازی،

¹ Dilatometry

² Geophone

³ Shear wave velocity

⁴ Seismic Flat Dilatometer

⁵ L'Aquila

⁶ Silvano Marchetti

⁷ Robertson



شکل ۳- نسخه کنونی تیغه دیلاتومتر [۲].

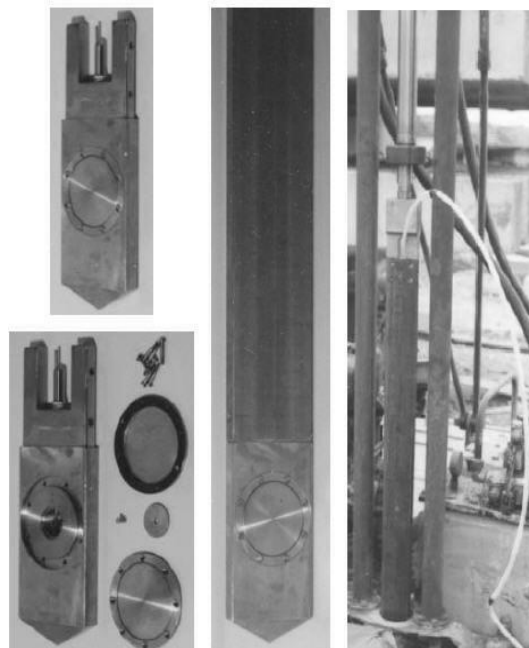
شکل کنونی تیغه (شکل ۳) با نمونه اولیه تفاوت‌هایی دارد که عمدتاً به منظور سهولت نفوذ آن در خاک و تسهیل خروج تیغه از درون خاک بوده است [۲].

۱-۳- اولین کاربرد عملی دیلاتومتر

مارچتی دیلاتومتر ساخته شده خود را در کنفرانس تخصصی انجمن مهندسان عمران آمریکا *ASCE*^۸ که در شهر رالی^۹ در کالیفرنیا شمالی^{۱۰} برگزار شد؛ بطور مفصل معرفی و تشریح کرد. سپس در ۱۹۸۰ مقاله‌ای در *ASCE* به چاپ رساند که تا به امروز به عنوان یکی از معتبرترین منابع اجرای این آزمون برجای استفاده می‌شود [۳].

همچنین وی در سال ۱۹۷۹ تجهیزات لازم به منظور ارزیابی دستگاه توسط دکتر شمترمان^{۱۱} (استاد سابق ژئوتکنیک دانشگاه ایالتی فلوریدا^{۱۲}) را فراهم کرد. دیوید کریس^{۱۳} با همراهی ویلیام وایتهد^{۱۴} و یک تکنسین اولین تست دیلاتومتری را در ایالات متحده آمریکا در دانشگاه فلوریدا انجام دادند. همبستگی ابتدایی مقادیر در دیلاتومتر بسیار امیدوارکننده بود. به طوری که پس از انجام اولین آزمایش‌ها در دانشگاه فلوریدا، در خصوص ارزیابی ویژگی‌های خاک

به همین علت به راحتی انجام‌پذیر نبوده است.



شکل ۱- نخستین دیلاتومتر تیغه‌ای ساخته شده توسط پروفیسور مارچتی در ۱۹۷۴ [۲].

در سال ۱۹۷۵ جنس دیافراگم از مس به استیل و محل اتصال تیغه به راد بصورت دایره‌ای شکل اصلاح شد (شکل ۲).



شکل ۲- نسخه تیغه ساخته شده در سال ۱۹۷۵ [۲].

⁸ American Society of Civil Engineers

⁹ Raleigh

¹⁰ North California

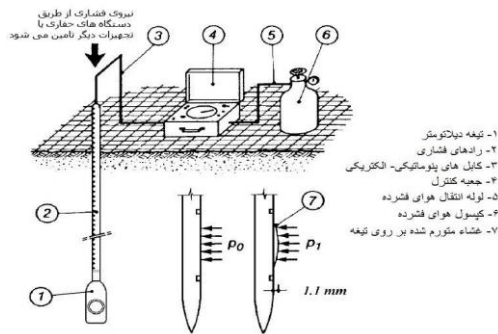
¹¹ Schmertmann

¹² Florida State University

¹³ David K. Crapps

¹⁴ William Whitehead

تخلیه هوا^{۲۴} و سیستم هشدار صوتی^{۲۵} مجهز شده است. تیغه با استفاده از تجهیزات معمول، مانند تجهیزاتی که در آزمون^{۲۶} CPT به- کار گرفته می‌شود و یا دکل‌های حفاری به داخل زمین فرستاده می- شود. رادهای فشاری نیز جهت انتقال نیروی رانش از سوی دستگاه حفار و نفوذ در عمق‌های بیشتر به تیغه استفاده می‌شود[۵]. نمای کلی اجرای آزمایش دیلاتومتر تخت در (شکل ۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- نمای کلی اجرای آزمون دیلاتومتر تیغه‌ای[۵].

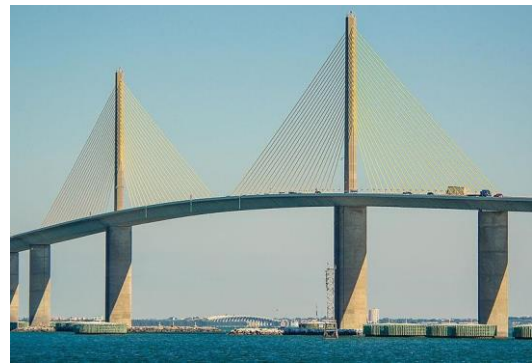
آزمایش با فرستادن تیغه به درون زمین شروع شده و پس از نفوذ تیغه به درون، زمین اپراتور با باز کردن شیرهای هوای فشرده اقدام به متورم کردن دیافراگم فلزی می‌کند و قرائت فشارسنج‌ها که حدوداً یک دقیقه زمان می‌برد شروع می‌شود. این قرائت شامل ۲ بخش خواهد بود:

فشار A : به منظور ایجاد فاصله بین دیافراگم و بدنه بر اثر فشار وارده از خاک به تیغه. که اصطلاحاً به آن "لیفت آف"^{۲۷} می‌گویند.
 فشار B : به منظور اتساع دیافراگم فلزی به اندازه ۱٫۱ میلی‌متر از وضعیت ابتدایی آن در مقابل فشار وارده از سوی خاک[۵].
 فشارهای A و B باید پس از قرائت بر اساس مقادیر ΔA و ΔB که با کالیبراسیون دستگاه به‌دست می‌آیند، تصحیح شوند تا سختی دیافراگم درنظر گرفته شده و تبدیل به مقادیر P_0 و P_1 شوند. روابط ۱ و ۲ مقادیر P_0 و P_1 را بر اساس قرائت‌های A و B و ΔA و ΔB نشان می‌دهد: [۶].

$$P_1 = B - Z_m - \Delta B \quad (2)$$

رس تحکیم یافته واقع در زیر پایه‌های برج خنک‌کننده یک کارخانه تولید برق در فلوریدای شمالی درخواست مشاوره‌ای به شمرتمان مطرح شد. تست دیلاتومتري برای این منظور در آگوست ۱۹۷۹ انجام شد و نشان داد که لایه رسی، بیش تحکیم یافته است و با لحاظ کردن محدودیت‌هایی، اجرای فونداسیون کم عمق برای آن کفایت می‌کند[۳].

موسسه شمرتمان و کراپس بیش از ۱۰۰۰ تست دیلاتومتري را در تحقیقات ژئوتکنیکی در پروژه پل بزرگراهی سان شاین اسکای - وی^{۱۵} که از خلیج تمپای فلوریدا^{۱۶} می‌گذشت انجام داد و این اولین کاربرد عملی دستگاه دیلاتومتر در پروژه‌های بزرگ در ایالات متحده آمریکا بود. این پل با ۶۶۶۳ متر طول و ۱۳۱ متر ارتفاع در ۲۰ آوریل ۱۹۸۷ جایگزین پل پیشین شد و به‌صورت رسمی بازگشایی گردید[۴]. (شکل ۴) تصویر پل سان شاین اسکای وی را نشان می- دهد که اولین کاربرد اساسی دیلاتومتر در پروژه‌های عمرانی بود[۴].



شکل ۴- پل Sunshine skyway در فلوریدای آمریکا[۴]

۴- شرح عمومی دستگاه

دیلاتومتر تخت از یک تیغه استیل ضدزنگ^{۱۷} تشکیل شده که یک دیافراگم^{۱۸} فولادی ضدزنگ بر روی آن نصب شده است. تیغه از طریق یک کابل پنوماتیکی - الکتریکی^{۱۹} به بخش کنترل واقع در سطح زمین متصل شده است که انتقال فشار هوا و جریان الکتریکی از طریق این کابل صورت می‌گیرد. این تیغه از طریق راد^{۲۰}هایی که به هم متصل شده‌اند از سطح زمین به عمق مورد نظر فرستاده می- شوند. کپسول هوای فشرده در سطح زمین از طریق کابل‌های پنوماتیکی - الکتریکی به دستگاه کنترل وصل می‌شود. واحد کنترل^(۱) به یک شیر تنظیم کننده فشار^{۲۱} کیچ فشارسنج^{۲۲} شیر

¹⁵ Sunshine skyway

¹⁶ Tampa Bay

¹⁷ Stainless Steel

¹⁸ Diaphragm

¹⁹ Pneumatic electric tube

²⁰ Rod

²¹ Control Unit

²² Pressure Regulator valve

²³ Pressure Gauge

²⁴ Vent

²⁵ Sound Alarm System

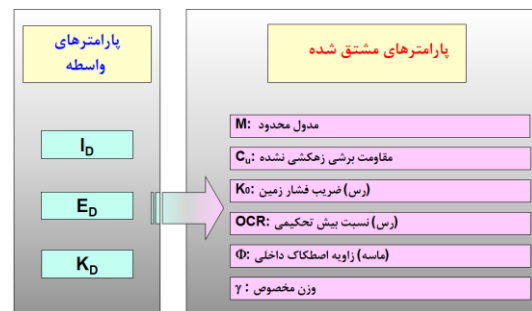
²⁶ Cone Penetration Test

²⁷ Lift-off

Z_m انحراف از صفر گنج های فشار است و با قرائت گنج ها در فشار اتمسفر تعیین می‌شود [۶].

۴-۱- پارامترهای واسطه

روش اصلی استفاده از نتایج دیلاتومتر تیغه‌ای به این شکل است که این نتایج را از نظر مهندسی، به عنوان پارامترها و ویژگی‌های خاک تفسیر می‌کنند. از این طریق پارامترهای بدست آمده از روش‌های مختلف را بررسی کرده و پروفایل‌های طراحی را انتخاب می‌کنند و سپس روش‌های معمول طراحی را به کار می‌برند. این تفسیر با شناسایی سه پارامتر DMT شامل E_D, K_D و I_D تکامل یافت. از این سه پارامتر اساسی به عنوان پارامترهای واسطه نیز نام برده می‌شود. سپس ارتباط آنها با پارامترهای خاک در مهندسی مورد استفاده قرار گرفت و سایر پارامترها از این سه مشتق شدند [۷]. شکل ۶ روند تعیین پارامترهای مشتق شده از واسطه را نشان می‌دهد.



شکل ۶- پارامترهای مشتق شده از پارامترهای واسطه

۴-۱-۱- شاخص ماده I_D نوع خاک

به طور کلی شاخص I_D مشخصات مقطع خاک را بیان می‌کند و در خاک‌های نرمال، شرح کاملی از خاک را ارائه می‌دهد. هر وقت از I_D استفاده شود باید این موضوع را مدنظر قرار داد که I_D نتیجه یک غربال و الک نیست؛ بلکه پارامتری است که رفتار مکانیکی خاک و احتمالاً نوعی شاخص سختی را منعکس می‌کند. با کمی اغراق می‌توان گفت، برای کسی که به رفتار مکانیکی خاک علاقه‌مند باشد، ممکن است یک توصیف براساس رفتار و واکنش مکانیکی مهم‌تر از توزیع دانه‌بندی واقعی باشد. به عنوان مثال اگر یک خاک رس به دلایل مختلف نسبت به بیشتر خاک‌های رس سفت و سخت‌تر رفتار کند؛ چنین خاک رسی با شاخص I_D بعنوان سیلت شناخته خواهد شد. چنین توضیحی از نظر دانه‌بندی درست به نظر نمی‌رسد و شاید بیشتر مربوط به این باشد که بر اساس نوع خاک، انتظار رفتار مکانیکی دیگری می‌داشتیم. از سوی دیگر اگر تمرکز بر نفوذپذیری باشد؛ آنگاه I_D باید توسط شاخص دیگری به نام U_D تکمیل شود [۷].

مطابق رابطه ۳ مقدار I_D از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_1 - u_0} \quad (3)$$

در این رابطه u_0 فشار آب منفذی پیش از نفوذ تیغه در خاک است.

همچنین مطابق (جدول ۱) طبقه‌بندی خاک بر اساس شاخص I_D با جزئیات بیشتری نشان داده شده است [۸].

جدول ۱- طبقه‌بندی خاک با توجه به شاخص ماده I_D

Soil Type	Material index I_D (-)
Peat/Sensitive	<0.10
Organic Clays	0.1-0.35
Clay	0.35-0.60
Silty Clay	0.60-0.90
Clayey Silt	0.90-1.20
Silt	1.20-1.80
Sandy Silt	1.80-3.30
Silty Sand	>3.30
Sand	

۴-۱-۲- شاخص تنش افقی K_D

K_D را می‌توان به عنوان یک K_0 که با نفوذ در خاک تقویت شده در نظر گرفت. نمودار K_D از نظر شکل بسیار شبیه به نمودار OCR بوده و از این رو K_D عموماً برای دانستن ذخیره و اطلاع از سابقه تنش بسیار کمک خواهد کرد. به عنوان مثال ارزش K_D برای رس-های OC برابر ۲ می‌باشد [۸]. رابطه ۴ برای محاسبه مقدار K_D ارائه شده است:

$$K_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad (4)$$

۴-۱-۳- مدول دیلاتومتر E_D

E_D بر اساس P_0 و P_1 و نیز بر اساس تئوری الاستیسیته برای ابعاد مناسب و شرایط مرزی محدود بدست می‌آید. به علت در دسترس نبودن اطلاعاتی مانند سابقه تنش، E_D فقط باید با K_D و I_D استفاده شود [۹]. رابطه ۵ نحوه محاسبه مدول دیلاتومتر را نشان می‌دهد:

$$E_D = 34.7(P_1 - P_0) \quad (5)$$

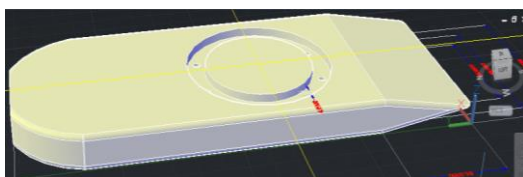
۴-۲- پارامترهای مشتق شده

جدول ۲ روابط پارامترهای مشتق شده و ارتباط آنها با پارامترهای واسطه را بصورت کامل نشان می‌دهد.

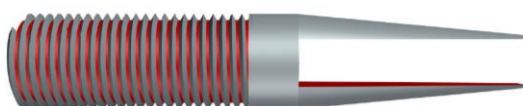
²⁸ Material Index

جدول ۲- روابط پارامترهای مشتق شده از سه پارامتر اصلی و واسطه دیلاتومتر [۱۰].

SYMBOL	DESCRIPTION	FORMULA
P_0	Corrected First Reading	$P_0 = 1.05 (A - Z_M + \Delta A) - 0.05 (B - Z_M - \Delta B)$
P_1	Corrected Second Reading	$P_1 = B - Z_M - \Delta B$
I_D	Material Index	$I_D = (P_1 - P_0) / (P_0 - u_0)$
K_D	Horizontal Stress Index	$K_D = (P_0 - u_0) / \sigma'_{v0}$
E_D	Dilatometer Modulus	$E_D = 34.7 (P_1 - P_0)$
K_0	Coeff. Earth Pressure in situ	$K_{0,DMT} = (K_D / 1.5)^{0.47} - 0.6$
OCR	Over consolidation Ratio	$OCR_{DMT} = (0.5 K_D)^{1.56}$
C_u	Undrained Shear Strength	$C_{u,DMT} = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25}$
ϕ	Friction Angle	$\phi_{Safe,DMT} = 28^\circ + 14.6^\circ \log K_D - 2.1^\circ \log^2 K_D$
C_h	Consolidation Coefficient	$C_{h,DMT} \approx 7 \text{ cm}^2 / t_{flex}$
K_h	Permeability Coefficient	$K_h = C_h \gamma_w / M_h (M_h \approx K_0 M_{DMT})$
γ	Unit weight and Description	(See chart)
M	Vertical Drained Constrained Modulus	$M_{DMT} = R_M E_D$ If $I_D \leq 0.6$ $R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$ If $I_D \geq 3$ $R_M = 0.5 + 2 \log K_D$ If $0.6 < I_D < 3$ $R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D$ Where $R_{M,0} = 0.14 + 0.15 (I_D - 0.6)$ If $K_D > 10$ $R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$ If $R_M < 0.85$ set $R_M = 0.85$
U_0	Equilibrium Pore Pressure	$U_0 = p_2 = C - Z_M + \Delta A$
G_0	Maximum shear modulus	$G_0 = \rho \cdot (V_s)^2$
V_s	Shear wave velocity	$V_s = (S_2 - S_1) / \Delta t$



شکل ۷- تیغه در حال طراحی با Auto Cad 3D

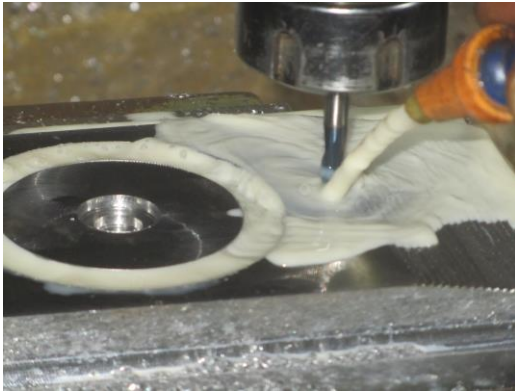


شکل ۸- نمای سه بعدی از رابط تیغه و راد

۵- فرآیند طراحی و ساخت

با توجه به ماهیت اجرای این پروژه که طراحی و ساخت دیلاتومتر تیغه‌ای مجهز به سنسور لرزش بود، در ابتدا اقدام به جمع‌آوری اطلاعات در خصوص تاریخچه طراحی و ساخت و همچنین مشکلات موجود در طرح‌های اولیه تا دستیابی به شکل کنونی آن گردید. ابعاد و اندازه تیغه از مقادیر اعلامی در نشریات و وبسایت‌های مرتبط [۵] و [۹] به دست آمد. نقشه‌ها با نرم افزار AutoCAD 3D طراحی و بارها مورد بررسی و بازنگری قرار گرفت تا ایرادهای احتمالی در فرآیند تولید به حداقل برسد. اشکال ۷ تا ۱۰ مراحل طراحی تیغه، رابط تیغه به راد، دیافراگم و واشر آهنی را نشان می‌دهد.

بعد از طراحی قسمت‌های اصلی تیغه و راد، فایل طراحی شده به فرمت ورودی دستگاه CNC^{30} تبدیل شد. یک بلوک آلیاژ فولادی متناسب با ابعاد تیغه تهیه و پس از سنگ‌زنی و ماشین‌کاری، عملیات فرزکاری با CNC انجام شد. شکل ۱۲ تیغه دیلاتومتر را در حال تراش نشان می‌دهد.

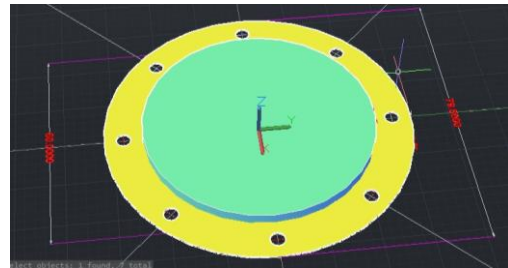


شکل ۱۲- تیغه دیلاتومتر در حال تراش CNC

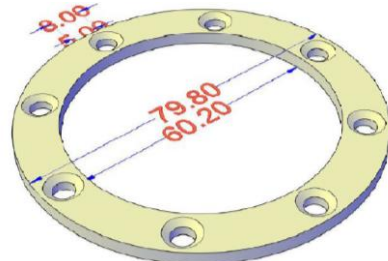
پس از اتمام فرزکاری، کنترل ابعاد و تطبیق با نقشه صورت گرفت و سپس تیغه برشکاری شده و رابط راد توسط جوش آرگون به یکدیگر متصل شدند. در بخش میانی تیغه، سنسور جابجایی با قابلیت حرکت $1/1$ میلی‌متر به صورت مجزا طراحی و ساخته شد و به وسیله پیچ‌های تفلونی این سنسور به بدنه اصلی تیغه متصل شد. این سنسور به صورت یک کلید الکتریکی عمل می‌کند و هنگامی که میله عایق مرکزی به اندازه $1/1$ میلی‌متر از سطح سنسور فاصله گرفته باشد اتصال از درون سنسور باعث فعال شدن بازو الکترونیکی شده و صدای بوق از واحد کنترل شنیده می‌شود. شکل ۱۲ سنسور جابجایی میانی سنسور را از نمای نزدیک نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- سنسور جابجایی پیش از نصب روی تیغه

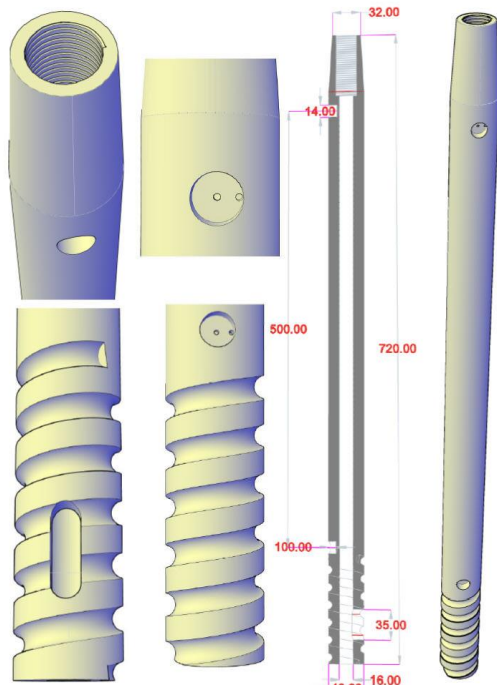


شکل ۹- نمای پرسپکتیو از دیافراگم طراحی شده



شکل ۱۰- نمای سه بعدی واشر آهنی جهت بستن دیافراگم

در طراحی راد به منظور نصب سنسورهای حساس به لرزش به فاصله ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر فضایی تعبیه شد. همچنین به جهت جلوگیری از آسیب رسیدن به لوله‌های پنوماتیکی - الکتریکی در بخش بالایی راد یک سوراخ لوبیایی جهت خروج لوله در نظر گرفته شد. در جنس راد به منظور تحمل تنش‌های فشاری هنگام ورود به خاک از آلیاژ سخت VCM^{29} استفاده شد. شکل ۱۱ راد طراحی شده را از نماهای مختلف نشان می‌دهد.

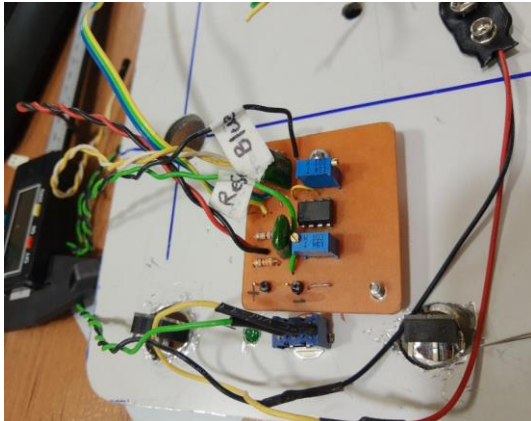


شکل ۱۱- راد طراحی شده از نماهای مختلف به همراه اندازه‌گذاری بر روی مقطع طولی

³⁰ Computer numerical control

²⁹ Vanadium Carbide Nitride

طراحی برد مدار چاپی یا PCB^{31} جهت مونتاژ قطعات با نرم افزار فریتزینگ³² انجام شد. پس از انتقال مدار چاپی به برد خام و ساخت برد با روش انحلال اسیدی توسط پرکلرودوفر³³ قطعات بعد از سوراخ کاری برد بر روی آن مونتاژ شدند. برای مشاهده موج دریافتی و ثبت آن از یک نرم افزار تحت ویندوز با نام MIP^{34} استفاده شد. شکل ۱۶ برد مدار چاپی ساخته شده را پس از مونتاژ قطعات نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- نمایی از پشت پنل کنترل و واحد الکترونیکی شامل ورودی‌ها، خروجی‌ها و برد راه انداز سنسورها

سنسورهای حساس به لرزش پس از ایزوله شدن درون فضای تعبیه شده در راد نصب شدند. سیگنال دریافتی سنسورها از طریق یک کابل ۴ رشته نازک به واحد کنترل منتقل و پس از تقویت سیگنال، توسط مدار راه‌انداز خروجی به صورت آنالوگ و دیجیتال در دسترس بود.

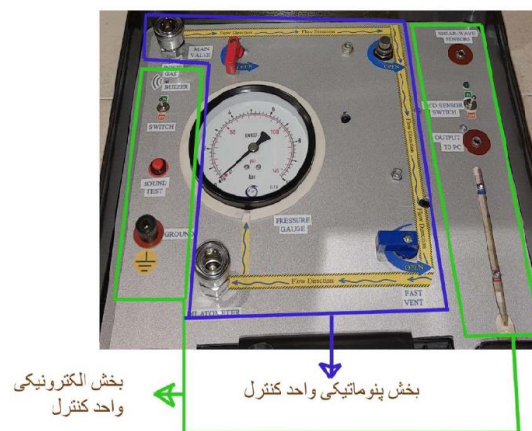
قابلیت ارسال سیگنال موج دریافتی از طریق برد آردوینو³⁵ و شیلدهای توسعه برای این نوع سنسور وجود داشت و این یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های جدید این سنسور می‌باشد که امکان مانیتورینگ امواج را بر بستر اینترنت با هزینه اندک فراهم می‌کرد. برای تولید موج برشی از یک پتک ۱۰ کیلوگرمی و یک پد آهنی مطابق شکل ۱۷ استفاده شد. ابعاد و مشخصات پد آهنی برگرفته از وبسایت مارچتی و وزن پتک نیز مطابق مشخصات استاندارد $ASTM D7400$ [۱۱] بوده است.

برای ساخت دیافراگم از ورق استیل نگیر فنری با ضخامت ۰٫۲ و ۰٫۲۵ میلی‌متر استفاده شد. دیافراگم دارای یک لبه پله‌ای شکل است که واشر هوا بند در زیر و واشر فلزی بر روی آن نصب شده و به وسیله ۸ پیچ فلزی به بدنه تیغه بسته می‌شود. برای شکل‌دهی به ورق خام دیافراگم، یک قالب طراحی و ساخته شد. این قالب متشکل از یک سنبه استوانه‌ای شکل، یک ماتریس و بخشی به عنوان ورق گیر بود که با نیروی فشاری معینی، مانع چین خوردگی و یا پارگی ورق حین پرس کاری می‌شد. شکل ۱۴ مجموعه قالب ساخته شده به منظور شکل‌دهی ورق دیافراگم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- سنبه استوانه‌ای شکل و ماتریس و ورقگیر

واحد کنترل به دو بخش الکترونیکی و پنوماتیکی تقسیم می‌شود. فعال شدن سنسورهای راد، دریافت موج لرزش، تبدیل به سیگنال خروجی و ارسال آن به کامپیوتر به بخش الکترونیکی مربوط می‌شود (کادر سبز رنگ شکل ۱۵). ورود گاز، کنترل فشار، قرائت فشار و خروجی آن به بخش پنوماتیکی (کادر آبی رنگ شکل ۱۵) ارتباط دارد.



بخش الکترونیکی واحد کنترل

شکل ۱۵- بخش الکترونیکی و پنوماتیکی پنل

³¹ Printed circuit board

³² Fritzing

³³ $FeCl_3$

³⁴ Multi Instrument Pro

³⁵ Arduino



شکل ۱۸- اجرای آزمون برجای در ایستگاه در حال ساخت بهار شیراز خط ۶ مترو تهران

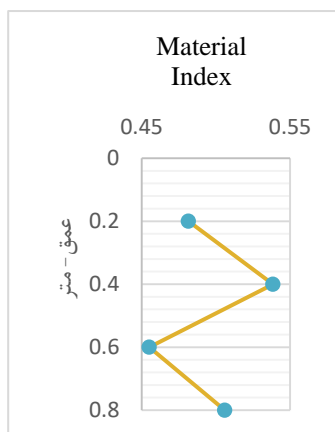


شکل ۱۷- پتک ۱۰ کیلویی و پد آهنی جهت تولید و انتقال موج برشی به زمین

جدول ۳- قرائت‌های انجام شده در آزمون برجای

عمق	A	B	P_0	P_1
0.2	2.8	4.7	2.835	4.2
0.4	2.9	5	2.925	4.5
0.6	3.2	5.2	3.23	4.7
0.8	3.3	5.5	3.32	5.0

بر اساس روابط جدول ۲ پارامترهای واسطه محاسبه شدند. نمودارهای ۱ تا ۳ پارامترهای واسطه را در عمق نفوذ نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار ۱ دیده می‌شود مقدار I_D در محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ است. مطابق شرح جدول ۱ که بر مبنای شاخص ماده، به ویژگی‌های جنس خاک پرداخته، نوع خاک را می‌توان *Silty Clay* متصور شد.



نمودار ۱- شاخص ماده (شاخص خاک)

۶- اجرای آزمون برجای

۶-۱- اهمیت اجرای آزمون برجای

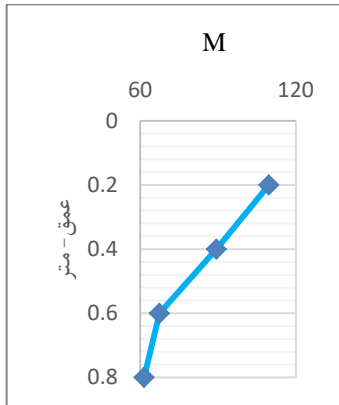
پس از طراحی و ساخت دیلاتومتر، اجرای آزمون برجای به منظور ارزیابی عملکرد دستگاه و شناسایی نواقص محتمل و رفع آنها در نمونه‌های بعدی، از اهمیت بالایی برخوردار بود. پس از اخذ مجوزهای لازم، این آزمون در ایستگاه در حال ساخت بهار شیراز واقع در تقاطع خیابان شریعتی و بهار شیراز در بخش حفاری تقسیم مسافر ایستگاه در تراز تیکت‌هال^{۳۶} در ارتفاع ۷،۳۰+ از سطح ریلی و عمق ۳۰ متری سطح زمین و کیلومتر ۱۲،۶۰۳+ در بهمن ماه ۱۴۰۰ انجام شد.

شکل ۱۸ تصویر اجرای آزمون برجای در ایستگاه بهار شیراز خط ۶ مترو تهران را نشان می‌دهد.

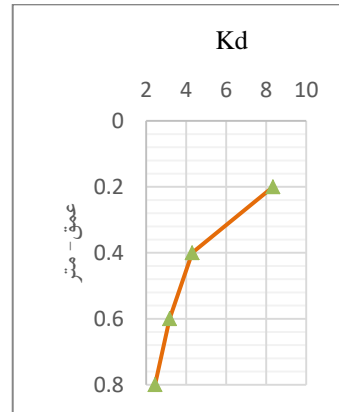
پارامترهای دلتا A و دلتا B بر اساس دستورالعمل کالیبراسیون و پیش از آزمون، اندازه‌گیری و ثبت شدند. این مقادیر برای دلتا A به میزان ۰/۱ بار و برای دلتا B ۰/۵ بار بود. سرعت نفوذ مطابق استاندارد $ASTM D6635^{37}$ [۱۰]، و حدود ۲ سانتی‌متر بر ثانیه بود. بعد از نفوذ به اندازه ۲۰ سانتی‌متر با ورود هوای فشرده، قرائت مقادیر A و B انجام شده و بعد از تصحیح بر اساس روابط ۱ و ۲ با نام‌های P_0 و P_1 نام‌گذاری شدند. جدول ۳ قرائت‌های A و B و همچنین مقادیر تصحیح شده P_0 و P_1 را نشان می‌دهد.

³⁶ Ticket Hall

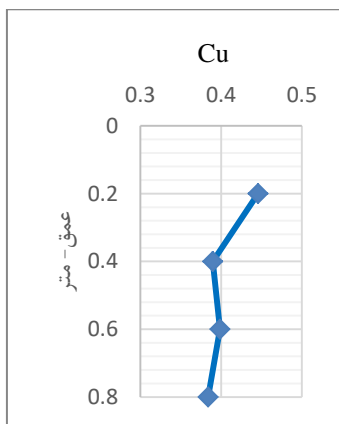
³⁷ Standard test method for performing flat plate dilatometer



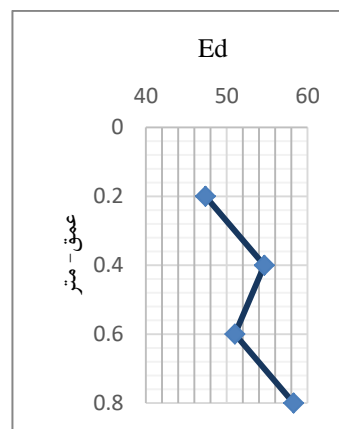
نمودار ۴- تغییرات مدول مماسی محدود M



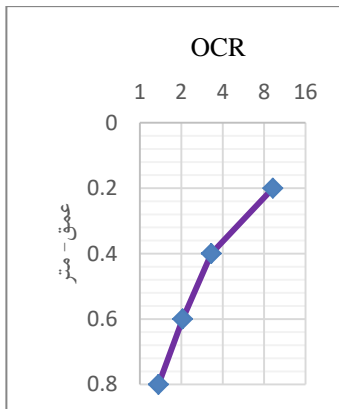
نمودار ۲- شاخص تنش افقی



نمودار ۵- مقاومت برشی زهکشی نشده



نمودار ۳- مدول دیلاتومتری



نمودار ۶- OCR

شاخص تنش افقی در اثر افزایش عمق، کاهش لگاریتمی داشته و از محدوده ۸ به ۲ تنزل یافته است. این تغییرات در نمودار ۲ دیده می‌شود. مدول دیلاتومتری (نمودار ۳) در عمق آزمون در محدوده ۴۷ تا ۵۸ بار بوده است. مطابق نمودار $XI.1$ که توسط مارچتی در استاندارد $ASTM 6635$ و بر اساس ارتباط شاخص ماده و مدول دیلاتومتری ارائه شده، مقدار وزن مخصوص نسبی خاک ۱٫۷ می‌باشد [۱۰]. مدول مماسی محدود زهکشی شده M از جدول ۲ و بر اساس مقادیر پارامترهای واسطه به دست آمده است. این مدول تحت تاثیر افزایش نفوذ از ۱۱۰ بار به ۶۱ بار تقلیل یافته است. نمودار ۴ تغییرات مدول مماسی محدود را نشان می‌دهد.

مقاومت برشی زهکشی نشده (نمودار ۵) از دیگر پارامترهای مشتق شده است که از جدول ۲ به دست می‌آید. این پارامتر در محدوده ۰٫۴۴ تا ۰٫۳۸ بار تغییرات کمی داشته که به نظر می‌رسد تحت تاثیر پارامترهای σ'_{v0} و K_D بوده است. نمودار ۶ سابقه بارگذاری یا OCR را نشان می‌دهد. بر اساس یافته‌ها این نمودار شباهت بسیاری به نمودار K_D دارد و در $KD=2$ مقدار $OCR=1$ خواهد بود.

همچنین زاویه اصطکاک داخلی در این آزمون از طریق پارامترهای واسطه محاسبه و اندازه‌گیری شد. اگر چه مقدار این پارامتر در نزدیکی سطح ۳۹/۶ درجه بود، اما نرخ کاهش آن با افزایش نفوذ نیز به تدریج کاهش یافته است؛ به طوری که بین قرائت سوم و چهارم اختلاف کمتری مشاهده شد و مقدار عددی تقریباً ثابت شد. (نمودار ۷)

۲-۶- مقایسه نتایج آزمون با نتایج گزارش نهایی

ژئوتکنیک خط ۶ مترو تهران

نتایج حاصل از آزمون برجای دیلاتومتري به منظور مقایسه و صحت-سنجی نسبی با پارامترهای مشابه در گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک خط ۶ مترو تهران که توسط شرکت مهندسين مشاور دریا خاک پی [۱۲] انجام شده است، مقایسه شد. به همین منظور از گمانه BH14 که در تقاطع خیابان بهار شیراز و خیابان شریعتی در ضلع جنوب غربی تا عمق ۴۵ حفاری شده است به عنوان نزدیک ترین منبع اطلاعاتی استفاده شد. در این گمانه جنس خاک رس سیلتی گزارش شده است. همچنین سایر خصوصیات مکانیکی خاک در این محل به شرح ذیل می باشند:

زاویه اصطکاک داخلی = ۳۳ درجه

مقاومت برشی زهکشی نشده = ۴۵ کیلوپاسکال

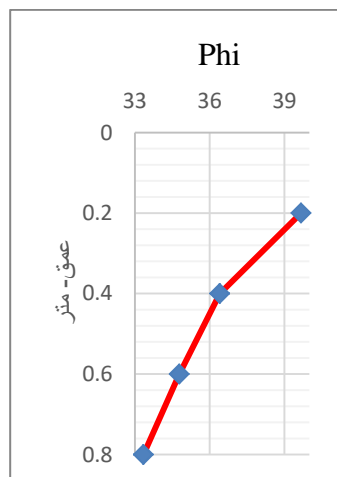
وزن مخصوص خشک خاک = ۱۸,۵ کیلونیوتن بر مترمکعب

سرعت موج برشی = ۵۶۰ متر بر ثانیه

لذا مقایسه پارمترها نشان داد که در تعیین جنس خاک هیچگونه اختلافی وجود ندارد. همچنین با افزایش عمق نفوذ تیغه، اختلاف عددی مقادیر در زاویه اصطکاک داخلی کمتر شده و در قرائت چهارم با مقدار گزارش نهایی مطابقت کامل دارد. در مقاومت برشی زهکشی نشده نیز در حدود ۱۰,۱۳ درصد انحراف از مقدار اعلام شده در گزارش نهایی مشاهده می‌شود که با اعمال ضریب ۱,۱۱۲۷۶ قابلیت تصحیح دارد. در خصوص وزن مخصوص این انحراف به ۸,۱۱ درصد می‌رسد و لذا ضریب تصحیح برای آن ۱,۰۸۸۲۳ می‌باشد. سرعت موج برشی به دست آمده با مقدار اعلام شده در گزارش ۹,۹۱ درصد انحراف را نشان می‌دهد که به نظر می‌رسد با افزایش عمق و حذف تاثیر عوامل محیطی (لرزش‌ها و نویزهای محیطی) امکان دستیابی به مقادیر واقعی تر میسر خواهد بود.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

در اجرای پروژه طراحی و ساخت این دیلاتومتر مشاهده شد که جنس تیغه حین نفوذ در خاک به علت برخورد با سنگدانه‌ها و ترکیبات آن آسیب‌پذیر است. استفاده از آلیاژهای فولادی مناسب‌تر نظیر آلیاژهای ابزارسازی با مقدار کربن بیشتر نظیر CK45 یا CK65 و انجام عملیات حرارتی روی آن، امکان ساخت تیغه مقاوم‌تر را فراهم می‌سازد. نتایج آزمون و مقادیر عددی به دست آمده از آزمون نشان داد که امکان اندازه‌گیری پارامترهای خاک وجود دارد؛ همچنین به منظور صحت سنجی مقادیر و عملکرد دستگاه و سنسورهای نصب شده در آن، مقادیر حاصل از اجرای این آزمون با نتایج ارائه شده در گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک خط ۶ مترو تهران، مقایسه عددی

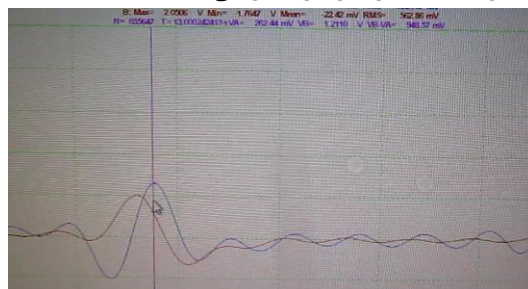


نمودار ۷- زاویه اصطکاک داخلی

این پارامتر تحت تاثیر جنس خاک و یا پارامتر واسطه I_D

تغییرات بیشتری از خود نشان می‌دهد.

اجرای آزمون لرزه‌ای و اندازه‌گیری سرعت موج برشی نیز مطابق استاندارد ASTM D7400 [۱۱]. که جهت آزمون *Downhole* ارائه شده، انجام شد. به همین منظور پد آهنی در فاصله ۲ متری از راد و مجموعه دیلاتومتر روی خاک قرار گرفت و ضربه‌ای با پتک به بخش عمودی پد زده شد تا امواج تولید شده از طریق سنسورهای راد دریافت و پس از پردازش در واحد کنترل از طریق کامپیوتر مشاهده شوند. دو موج آبی و قرمز نشان داده شده در شکل ۱۹ دریافت سیگنال ضربه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹- امواج دریافت شده توسط سنسورهای راد

هر دو موج هم‌فاز شده و Δt مورد محاسبه قرار می‌گیرد. مقادیر R_1 و R_2 نیز با توجه به فاصله از منبع تولید موج و عمق اجرای آزمون به سادگی محاسبه می‌شود. در نهایت بر اساس رابطه‌ای که در جدول ۲ ارائه شده سرعت موج برشی در خاک و در عمق آزمون محاسبه و ۵۰۴/۵ متر بر ثانیه به دست آمد. مدول برشی حداکثر نیز با توجه به وزن واحد خاک در محل آزمون و نیز سرعت موج برشی ۴,۳۳ مگاپاسکال محاسبه شد.

$$G_0 = \rho (V_s)^2 = 17 * (504.5)^2 = 4.33 \text{ MPa}$$

۹- فهرست نمادها

شرح	واحد	نماد
فشار وارده بر خاک	Pa	ΔP
زاویه اصطکاک داخلی	degree	ϕ
وزن مخصوص خاک	N/M^3	γ
تنش موثر قائم	Pa	$\sigma'v_0$
ضریب پواسون	-	ν
مقاومت برشی زهکشی نشده	bar	C_u
مدول دیلاتومتر	bar	E_D
مدول برشی حداکثر	Pa	G_0
شاخص ماده	-	I_D
ضریب فشار جانبی سکون خاک	-	K_0
شاخص تنش افقی	-	K_D
مدول الاستیسیته در شرایط تغییر شکل جانبی صفر	Pa	M
نسبت بیش تحکیمی	-	OCR
رس سیلتی	-	SC
فشار منفذی	Pa	U
سرعت موج برشی	m/s	V_s
انحراف از صفر گنج های فشار	bar	Z_m

صورت گرفت. لذا به منظور ارزیابی بهتر نتایج دستگاه، اجرای آزمون مقایسه‌ای پیشنهاد می‌شود. از سوی دیگر با توجه به اینکه یکی از ویژگی‌های آزمون‌های برجا قابلیت تکرارپذیری است؛ در صورت امکان می‌توان با تکرار آزمون برجا در یک سایت و جمع‌آوری اطلاعات نسبت به اندازه‌گیری و محاسبه ضریب تصحیح مشخصی برای هر یک از پارامترهای مورد نظر اقدام نمود. سنسور انتخاب شده جهت اندازه‌گیری سرعت موج برشی نیز کارایی خوبی از خود نشان داد و به نظر می‌رسد با افزایش عمق و حذف نویزهای محیطی انتظار دریافت موج‌های دریافتی مشابه‌تر دور از ذهن نخواهد بود.

۸- سپاسگزاری

از پدر بزرگوارم؛ جناب آقای مهندس رضا دادخواه تهرانی بابت مشاوره و راهنمایی در طراحی و ساخت بخش‌های پنوماتیکی و الکترونیکی دستگاه، از جناب آقای مهندس مزینانی مجری محترم خط ۶ مترو تهران بابت حمایت‌ها و صدور مجوز اجرای تست برجا و از جناب آقای مهندس اعلائی بابت هماهنگی در امور اجرایی قدردانی و سپاسگزاری می‌گردد.

منبع‌ها

Retrieved from <https://doi.org/10.3390/app8081395>.

[7] S., M. (January 1997). The Flat Dilatometer Design Applications. *Third Geotechnical Engineering Conference* (pp. 1-26). L'Aquila Italy: Cairo University.

[8] Rabarijoely S., (November 2018). A New Approach to the Determination of Mineral and Organic Soil Types Based on Dilatometer Tests (DMT),. *Applied Science*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/journal/applsci>

[9] Marchetti S., (2022, 08 31). *List Of Quality Controls*. Retrieved from Marchetti Dilatometer: <https://www.marchetti-dmt.it/instruments/dmt/list-of-quality-controls/>

[10] ASTM,. (2001). Standard Test Method For Performing Flat Plate Dilatometer. In A. Authors, *Annual Book Of the ASTM Standard* (pp. 1-15). West Conshohocken Unites States: ASTM International. doi:D-6635 - 01

[11] ASTM. (July 2008). Standard Test Method For Downhole Seismic Testing. In A. Authors, *Annual Book Of the ASTM Standard* (pp. 2-11). West Conshohocken Unites States: ASTM International.

[۱۲] مهندسیین مشاور دریا خاک پی، (۱۳۸۶). گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک خط ۶ مترو تهران.

[۱] حمیدی، امیر؛ خزاعی، سیروس. (۱۳۸۷). آزمایش دیلاتومتري در مهندسی ژئوتکنیک. تهران: سبزبان. doi:624/151

[2] Marchetti S. (2006). Origin of the Flat Dilatometer. *The second international flat dilatometer conference* (pp. 2-3). Washington D.C. United States.: ISSMGE.

[3] Crapps, D. K. (April 2006). *Brief History of the Flat Plate Dilatometer in North America*. Washington D.C., United States: Proceeding from the second international flat dilatometer conference.

[4] Wikipedia,. (2022, 08 30). *Sunshine Skyway Bridge*. Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Sunshine_Skyway_Bridge

[5] Marchetti S., Marchetti D., Monaco P., (2001). *The Flat Dilatometer Test (DMT) in soil investigation*. L'Aquila, Italy: Report from the ISSMGE Technical Committee on Ground Property Characterisation from In-situ Testing.

[6] Lechowicz Z., Fukue M., Rabarijoely S., Sulewska M. J. (2018). Evaluation of the Undrained Shear Strength if Organic Soils from a Dilatometer Test Using Artificial Neural Networks. *Applied Sciences*, 1-16.