

## بررسی عوامل تأثیرگذار بر نتایج آزمون‌های نفوذی ژئوتکنیک با کمک دستگاه نفوذگر ضربه‌ای دستی در خاک ماسه‌ای

مهدی سردار، سید احسان سیدی حسینی‌نیا\*

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۹

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۰۴

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

### کلمات کلیدی:

انرژی کوبش  
هندسه مخروط نفوذی  
خاک ماسه‌ای  
زاویه اصطکاک داخلی خاک  
دستگاه نفوذگر ضربه ای

**خلاصه:** آزمون‌های نفوذی یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های برجا هستند که با کمک آن‌ها، پارامترهای ژئوتکنیکی متنوعی را می‌توان تخمین زد. از ویژگی‌های آزمون‌های نفوذی، سرعت و سهولت انجام و تکرارپذیر بودن نتایج این آزمون‌ها است. در این پژوهش، با استفاده از یک ابزار نفوذی به نام «دستگاه نفوذگر ضربه‌ای دستی»، آزمایش‌هایی بر روی ماسه فیروزکوه با تراکم نسبی‌های مختلف انجام شده‌است. اساس کار این دستگاه مشابه دستگاه‌های نفوذی موجود در مهندسی ژئوتکنیک بوده و تفاوت آن در ابعاد و انرژی است. هدف از این پژوهش، بررسی اثر هندسه مخروط نفوذ و انرژی‌های کوبش مختلف بر نتایج آزمون بوده است. بدین منظور، از سه قطر مختلف مخروط، سه زاویه راس مختلف و سه جرم مختلف چکش استفاده شد. جهت مطالعه عملکرد دستگاه از شاخص نفوذ دینامیکی و مقدار میانگین وزنی آن نسبت به عمق نفوذ بهره گرفته شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که زاویه راس مخروط نقشی در نفوذ دستگاه نداشته، بلکه قطر مخروط است که می‌تواند مقدار نفوذ را تغییر دهد. همچنین، مشاهده شد رابطه‌ای خطی مستقیمی میان انرژی ضربات و میانگین شاخص نفوذ وجود دارد. بر اساس مشابهت مکانیزم نفوذ مخروط به زمان با شمع کوبشی، از رابطه مایهوف جهت تخمین زاویه اصطکاک داخلی خاک استفاده شد. از مقایسه نتیجه حاصل شده با مقدار حاصل از آزمون برش مستقیم، می‌توان گفت که با آزمون نفوذی می‌توان با دقت مناسبی، این پارامتر را بدست آورد.

### ۱- مقدمه

مخروط نفوذی به داخل زمین فرو می‌رود و با شمارش تعداد ضربات به ازای یک مقدار نفوذ معین، می‌توان مقاومت خاک در برابر نفوذ را بدست آورد و آن را به مشخصات مهندسی خاک ارتباط داد. طبق گزارش کلاین و همکاران [۱] در دومین همایش آزمون‌های نفوذی اروپا، قدیمی‌ترین این دستگاه‌ها، نفوذسنج کوبه‌ای (ram penetrometer) نام داشت که در اواخر قرن ۱۷ در کشور آلمان ساخته شد. با توسعه آن در سال ۱۹۳۶، دستگاه دیگری به نام پروف استب (Prufstab) ارائه شد و در نهایت در سال ۱۹۶۴، دستگاهی با نام کاوشگر دینامیکی (Dynamic Probe: DP) در آیین‌نامه DIN ۴۰۹۴ [۲] آلمان استانداردسازی شد [۳]. این دستگاه در چهار

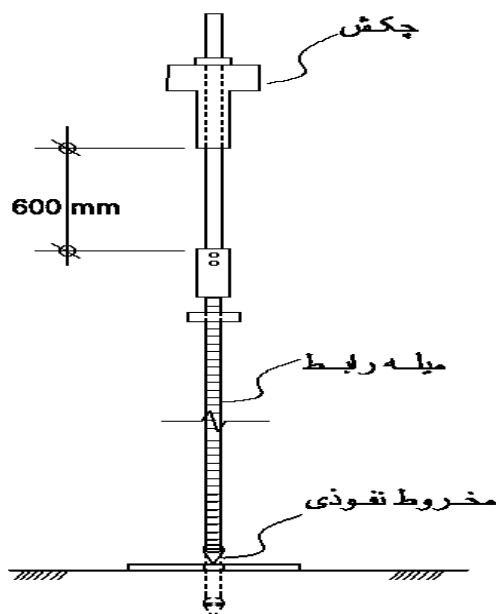
آزمون‌های مورد استفاده در مهندسی ژئوتکنیک جهت تخمین پارامترهای مهندسی خاک شامل آزمون‌های آزمایشگاهی و آزمون‌های برجا (میدانی) هستند. از آن میان، آزمون‌های نفوذی به عنوان بخشی از آزمون‌های برجا در عملیات شناسایی ساختگاه شناخته می‌شوند و به دستگاه مورد نظر، کاوشگر نفوذی گفته می‌شود. به طور کلی، یک کاوشگر نفوذی از سه قسمت اصلی به نام چکش، میله (های) اتصال و مخروط نفوذی تشکیل شده‌است. در یک کاوشگر نفوذی، با سقوط پی‌درپی چکش از ارتفاعی معین بر روی میله‌های اتصال، نویسنده عهده‌دار مکاتبات: [eseyedi@um.ac.ir](mailto:eseyedi@um.ac.ir)



دستگاه‌های کاوشگر نفوذی، تنوع زیادی در مشخصات هندسی مخروط‌های نفوذ و انرژی کوبش وجود دارد. مهم‌ترین سوالی که در استفاده از این دستگاه‌ها پیش می‌آید، بررسی نقش هندسه مخروط نوک (شامل زاویه رأس و قطر مخروط) و تأثیر انرژی وارد بر آن بر روی نتایج آزمون است. در این پژوهش، ابتدا یک کاوشگر نفوذی جدیدی با عنوان «نفوذگر ضربه‌ای دستی» معرفی می‌شود و سپس بر مبنای نتایج حاصل از آن، به بررسی اثر هندسه نوک و انرژی منتقل شده به نوک آن و تفسیر نتایج پرداخته خواهد شد.

## ۲- معرفی دستگاه نفوذگر ضربه‌ای دستی

طراحی و ساخت دستگاه «نفوذگر ضربه‌ای دستی» یا (MDP: Manual Dynamic Penetrometer) در دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت. این دستگاه در سازمان ثبت اسناد و املاک کشور با شماره ۹۴۵۱۰ ثبت اختراع شده [۱۴] و دارای تاییدیه علمی است. صورت کلی دستگاه در شکل ۱ نمایش داده شده است. اجزای کلی آن مشابه دو دستگاه قبلی بوده و از سه بخش چکش، میله رابط و مخروط نفوذی تشکیل شده است، به طوری که وزن چکش ۱۰ کیلوگرم، میله رابط حداقل به طول ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۶ میلی‌متر و البته قابل طویل شدن با اتصال میله‌های دیگر به آن است. چکش با کمک دست قابل جابجایی بوده و از ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متری سقوط



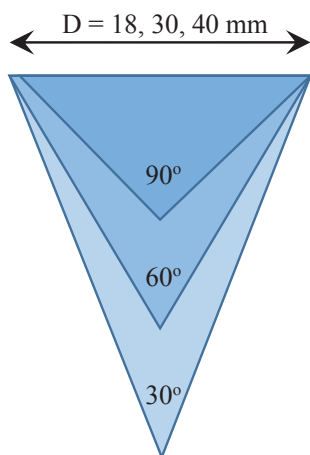
شکل ۱. طرح کلی دستگاه نفوذگر ضربه‌ای دستی یا MDP

Fig. 1. Schematic view of Manual Dynamic Penetrometer (MDP)

اندازه و قدرت نفوذ مختلف معرفی شده است. ساده‌ترین آن، کاوشگر دینامیکی سبک (DPL) است که در آن، از یک چکش ۱۰ کیلوگرمی استفاده شده و از ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متری سقوط می‌کند. زاویه نوک مخروط آن ۹۰ درجه است [۲]. مثال برجسته دیگری در زمینه ساخت و توسعه دستگاه‌های نفوذی، کاوشگر دینامیکی مخروطی (Dynamic Cone Penetrometer: DCP) است که توسط اسکالا [۴] در سال ۱۹۵۶ در کشور استرالیا ساخته شد. این دستگاه یک چکش ۹/۱ کیلوگرمی داشت که با سقوط آن از ارتفاع ۵۰۸ میلی‌متر، یک مخروط با زاویه رأس ۳۰ درجه و قطر ۲۰ میلی‌متر به داخل خاک رانده می‌شد. پس از آن، تغییراتی در DCP توسط وبستر و همکاران [۵] انجام شد، به طوری که چکش آن به دو تکه با اوزان ۴/۶ و ۳/۴ (مجموعاً هشت) کیلوگرم تقسیم شد. هم‌اکنون، شرح کار با این دستگاه و خصوصیات آن در استاندارد ASTM D۶۵۹۱-۰۳ [۶] ارائه شده است. کاوشگر مکینتاش (Macintosh Probe) یکی دیگر از نفوذسنج‌های سبک است که توسط کلیتون و همکاران [۷] معرفی و دربرگیرنده مخروط با قطر ۲۷/۹۴ میلی‌متر، زاویه رأس مخروط در آن ۳۰ درجه و وزن چکشی برابر ۴/۵ کیلوگرم است. کاوشگر مکینتاش تا عمق ۱۰ متری خاک و در مناطق با دسترسی سخت قابلیت استفاده دارد. نتایج کاوشگر مکینتاش تکرارپذیر بوده و می‌توان جهت شناسایی مقاومت خاک از آن استفاده نمود [۸].

آزمون‌های نفوذی تاکنون در تخمین پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹]. به عنوان مثال، می‌توان به تخمین پارامترهای نسبت باربری کالیفرنیا، ضریب برجهندگی، ضریب ارتجاعی، مقاومت تک‌محوری و زاویه اصطکاک داخلی خاک اشاره کرد [۱۰]. به طور خلاصه، مهم‌ترین مزایای آزمون‌های نفوذی نسبت به آزمون‌های آزمایشگاهی عبارتند از [۱۱، ۱۲]: سرعت نسبتاً زیاد آزمون، کم بودن هزینه ساخت و نگهداری، وزن کم و امکان قابل حمل (در مورد دستگاه‌های سبک)، پیوسته بودن نتایج آزمایش و امکان شناسایی وضعیت لایه‌بندی خاک، عدم نیاز به افراد متخصص و با تجربه و تکرارپذیر بودن نتایج. در عین حال، مهم‌ترین معایب انواع این آزمون‌ها عبارتند از [۱۳]: عدم کارایی آن در خاک‌های درشت دانه یا سیمانی شده، تأثیرپذیری ناشی از خطاهای انسانی و عدم امکان اخذ نمونه در حین آزمایش.

همان‌طور که اشاره شد، در مسیر توسعه و کارآمدسازی



شکل ۲. نمای هندسی کلی مخروطهای نفوذی مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 2. Geometric view of all cones used in this study

میلی‌متر در نظر گرفته شده و سه مخروط مختلف با قطر ۱۸ میلی‌متر و با زاویه‌های رأس ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه ساخته شدند. وزن چکش در سه مقدار پنج، هشت و ۱۰ کیلوگرم متغیر است. خاطر نشان می‌شود با توجه به اینکه نحوه کار کاوشگرهای نفوذی دیگر هم مشابه این دستگاه است، از نتایج این پژوهش می‌توان برای دستگاه‌های نفوذی دیگر نیز استفاده کرد.

### ۳- روش انجام آزمایش

پژوهش حاضر در محیط آزمایشگاه انجام شده است. خاک مورد استفاده در این آزمون‌ها، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه بوده که به صورت بدانه‌بندی شده (SP) طبقه‌بندی می‌شود. این خاک دارای رنگ زرد مایل به طلایی و دانه‌بندی یکنواخت است. مشخصات فیزیکی و زاویه اصطکاک داخلی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه در جدول ۱ نشان داده شده است. خاطر نشان می‌شود زوایای اصطکاک داخلی خاک در سه تراکم نسبی مختلف با کمک آزمون دستگاه برش مستقیم مربعی در تنش‌های نرمال کمتر از یک کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (به خاطر

جدول ۱. مقایسه کار (انرژی) مخصوص در هر ضربه برای دستگاه‌های مختلف نفوذی

Table 1. Comparison of specific energy for different penetrometers

ردیف	نام دستگاه	کار مخصوص در هر ضربه (کیلوژول بر متر مربع)
۱	دستگاه DPL طبق DIN4094	۴۹
۲	دستگاه DCP طبق استاندارد ASTM D6951	۱۴۴
۳	دستگاه MDP موردنظر این اختراع	۲۳۶

می‌کند. مخروط نفوذی در دستگاه MDP از یک مخروط با زاویه رأس ۶۰ درجه تشکیل شده و قطر آن ۱۸ میلی‌متر است. قطر مخروط دو میلی‌متر بزرگتر از میله رابط (اتصال) در نظر گرفته شده است تا حین نفوذ مخروط، تا حد امکان، از اصطکاک میان میله رابط و خاک اطراف جلوگیری شود.

ایده‌ی اصلی طراحی دستگاه MDP، افزایش قدرت نفوذ در برابر دستگاه‌های مشابه دیگر مخصوصاً DCP و DPL است تا بتوان، عمق بیشتری از زمین را مورد کاوش قرار داد. در جدول ۱، کار مخصوص دستگاه‌های DCP، DPL و MDP با هم مقایسه شده است. منظور از کار مخصوص، حاصل ضرب وزن چکش در ارتفاع سقوط تقسیم بر مساحت تصویر مخروط است. همانطور که ملاحظه می‌شود، کار مخصوص MDP به مراتب بیشتر از دو دستگاه دیگر است.

در این پژوهش، سعی شده است تا با تغییر مشخصات هندسی اجزای تشکیل دهنده دستگاه MDP، به بررسی و مطالعه تأثیر تغییرات این عوامل بر روی نتایج حاصل از این آزمون پرداخته شود. تغییرات مورد بررسی شامل بررسی تأثیر قطر مخروط، زاویه‌ی رأس مخروط و انرژی اعمالی (وزن چکش) است. بدین منظور، مطابق شکل ۲، دو مخروط نفوذی دیگر با زاویه رأس ۶۰ درجه و قطرهای ۳۰ و ۴۰

جدول ۲. مشخصات خاک ماسه‌ای ۱۶۱ فیروزکوه

Table 2. Characteristics of Firuzkuh-161 sand

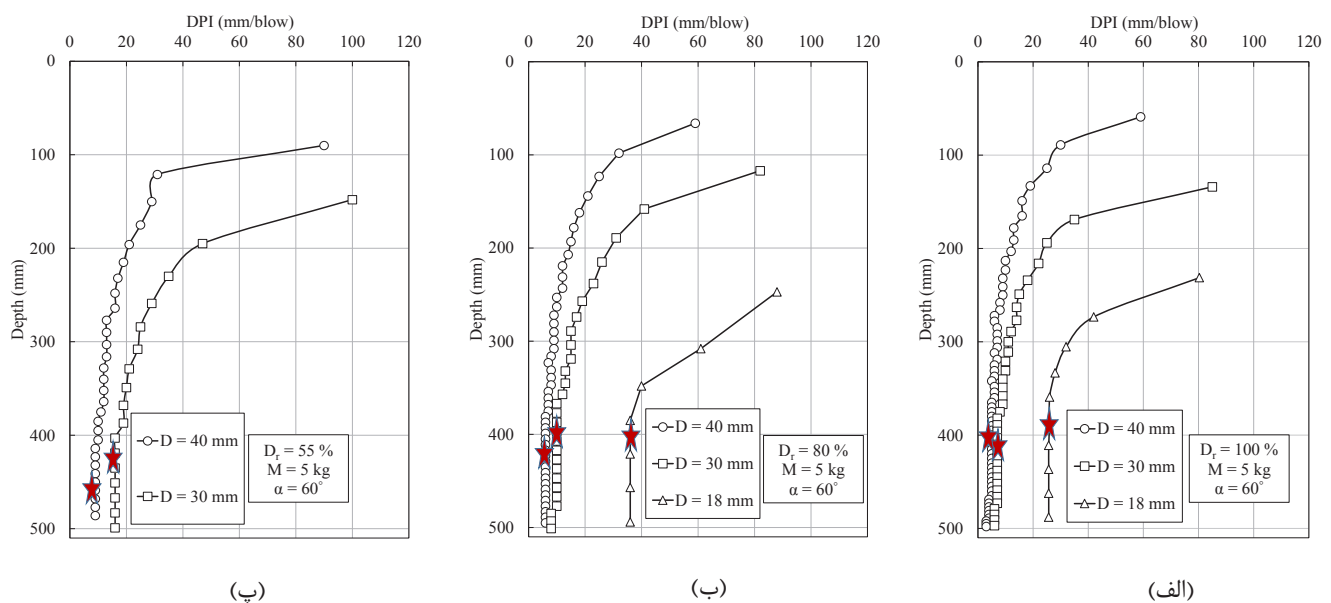
زاویه اصطکاک داخلی باقیمانده (درجه)	زاویه اصطکاک داخلی حداکثر (درجه)			نسبت تخلخل			ضریب انحنا (میلی‌متر)	ضریب ضریب	طبقه‌بندی خاک	
	تراکم نسبی (درصد)	چگالی ویژه	کمینه	بیشینه	یکنواختی					
۱۰۰	۸۰	۵۵								
۳۳	۵۰	۴۵/۴	۳۸/۱	۲/۶۵	۰/۵۶	۰/۸۷	۲/۰۶	۰/۲۹	۰/۸۴	بد دانه‌بندی شده (SP)

نظر، دستگاه نفوذگر ضربه‌ای به کار گرفته شده‌است. جهت حفظ راستای قائم دستگاه حین آزمون نفوذی و به دلیل کاهش خطاهای ناشی از انحراف آن حین کار، از یک سه‌پایه مشابه پژوهش لیونه [۱۸] استفاده شده‌است. جهت شروع آزمون نفوذی، چکش با کمک دست بالا آورده شده و رها می‌شود. حین آزمون، مقدار نفوذ مخروط به همراه تعداد ضربات وارد شده توسط چکش شمارش می‌شود. برای ثبت نتایج حاصل از این آزمون، از پارامتری به نام شاخص نفوذ دینامیکی (DPI) استفاده شده‌است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DPI = \frac{P_{i+1} - P_i}{B_{i+1} - B_i} \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱،  $P_i$  عمق نفوذ مخروط در  $i$ امین قرائت نفوذ (برحسب mm) و  $B_i$  مجموع ضربات چکش در  $i$ امین قرائت است. شاخص DPI درحقیقت، بیانگر فاصله‌ای است که نوک مخروط به ازای هر ضربه چکش داخل خاک جابه‌جا می‌شود و واحد آن، میلی‌متر به ازای هر ضربه (mm/blow) است. با رسم مقادیر DPI نسبت به عمق، می‌توان روند مقاومت در برابر نفوذ مخروط از میان لایه‌های مختلف خاک را مطالعه نمود. در شکل ۳، تغییرات DPI در مقابل عمق نفوذ برای مخروط با زاویه رأس ۶۰ درجه، وزن چکش پنج

سربار کم حین آزمون‌های نفوذی) حاصل شده‌اند. در مجموع، از نتایج ۵۴ آزمون نفوذی استفاده شده‌است. در این آزمون‌ها، ماسه در سه تراکم نسبی ۵۵، ۸۰ و ۱۰۰ درصد در داخل مخزن ساخته شدند. برای تهیه درجه تراکم مختلف و کوبیدن لایه‌های خاک، از یک کوبه استوانه‌ای با قطر ۱۶۰ میلی‌متر و وزن پنج کیلوگرم با ارتفاع سقوط متغیر (۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر) استفاده شده‌است و با آزمون و خطا، سعی در رساندن به درجه تراکم مورد نظر، استفاده شده‌است. جهت تراکم خاک با کوبه از استاندارد ASTM D۶۹۸-۱۲ [۱۵] بهره گرفته شده‌است. ماسه‌ها در دو مخزن فلزی دایروی به قطرهای ۰/۵ و ۱/۵ متری تهیه شدند. با توجه به نتایج تحقیق محمدی و همکاران [۱۶]، حداقل نسبت قطر مخزن به قطر مخروط، باید ۲۵ باشد تا محصورشدگی ناشی از محیط مخزن بر نتایج آزمون نفوذی بی‌اثر شود. از این‌رو، برای مخروط با قطر ۱۸ میلی‌متر از مخزن به قطر ۰/۵ و برای مخروط به قطرهای ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر، از مخزن به قطر ۱/۵ متر استفاده شده‌است. با توجه به تحقیقات وبستر و همکاران [۱۷]، مقدار حداقل عمق نفوذ مورد نیاز مخروط با دستگاه DCP برای اندازه‌گیری مقاومت لایه سطحی بدون سربار ۲۸۰ میلی‌متر بوده است. در این پژوهش، ارتفاع مخازن برابر ۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. پس از کوبیدن لایه‌های خاک داخل مخزن و حصول تراکم مورد



شکل ۳. تغییرات شاخص نفوذ دینامیکی در برابر عمق با چکش پنج کیلوگرم و زاویه رأس ۶۰ درجه در تراکم‌های نسبی: الف) ۱۰۰ درصد، ب) ۸۰ درصد، پ) ۵۵ درصد

Fig. 3. Variation of DPI along with depth for the 5kg-hammer and cone apex of 60° with relative density of: a) 100%, b) 80%, c) 55%

در نتیجه، رابطه‌ی ۳ به صورت ساده شده زیر تبدیل می‌شود:

$$DPI_{wt\ avg} = \frac{1}{H} \sum_1^N Z_i^2 \quad (3)$$

در این بخش، نتایج حاصل از آزمون نفوذگر ضربه‌ای دستی (MDP) بر اساس میانگین وزنی شاخص نفوذ دینامیکی ارائه شده و نتایج آن بر حسب عوامل مختلف تأثیرگذار بر نتایج شامل قطر مخروط نفوذ، زاویه نوک مخروط، انرژی کوبش و تراکم نسبی خاک ماسه‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱- قطر مخروط نفوذ

جهت بررسی تأثیر قطر مخروط نفوذ بر نتایج آزمون نفوذی این پژوهش، آزمون‌ها در هر سه تراکم مختلف ۵۵، ۸۰ و ۱۰۰ درصد خاک ماسه‌ای و با انرژی‌های (وزن چکش) مختلف انجام شدند که نتایج آن طبق شکل ۴ است. خاطر نشان می‌شود فقط نتایج مربوط به مخروط با زاویه رأس ۶۰ درجه ارائه شده‌است. از مقایسه نتایج، می‌توان گفت هرچه قطر مخروط بزرگتر شود، مقدار نفوذ کوچک‌تر می‌گردد. برای توضیح آن، می‌توان به تعریف تنش توجه کرد که از تقسیم نیرو (وزن چکش) بر سطح مقطع به دست می‌آید. لذا، با افزایش قطر مخروط و در نتیجه سطح مقطع آن، تنش کمتری به لایه خاک انتقال می‌یابد و در نتیجه، نفوذ کمتری در خاک رخ می‌دهد. از میان این آزمون‌ها، امکان انجام آزمون با چکش‌های هشت و ده کیلوگرمی برای تراکم ۵۵٪ نبود و به دلیل سستی خاک، مخروط نفوذی با وزن خود کاملاً فرو می‌رفت.

تغییرات نزولی  $DPI_{w\ avg}$  با قطر مخروط تقریباً خطی است. اگر روند نزولی  $DPI_{w\ avg}$  با قطر مخروط (D) به صورت خطی تقریب زده شود، داریم:

$$DPI_{wt\ avg} = -\alpha D + \beta \quad (4)$$

که در آن  $\alpha$  شیب خط و  $\beta$  عرض از مبدأ بوده و مقادیر در جدول ۳ ارائه شده‌است. ضریب رگرسیون محاسبه شده نشان می‌دهد که تغییرات با دقت بالایی به صورت خطی است. همچنین، مشاهده می‌شود با افزایش وزن چکش، شیب نمودارها نیز افزایش یافته و در عوض، مقدار عرش از مبدأ، کاهش می‌یابد.

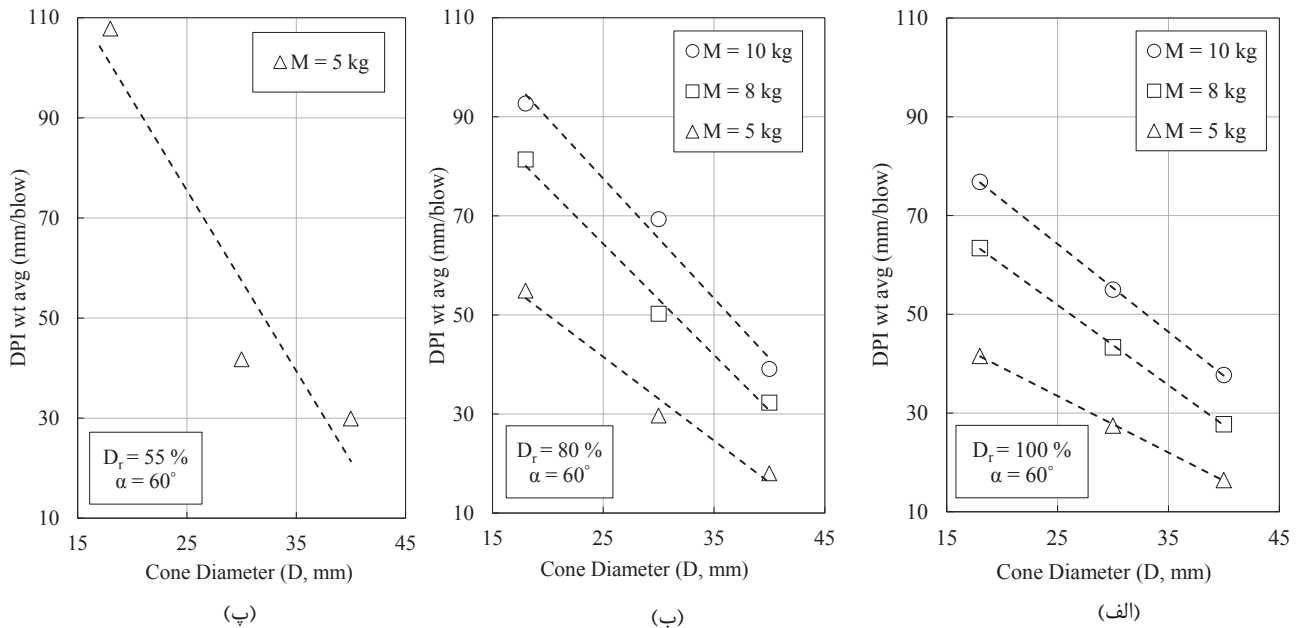
کیلوگرم، قطرهای مختلف مخروط و برای سه درجه تراکم مختلف نشان داده شده‌است. با توجه به نتایج کسب شده در شکل ۳، می‌توان گفت که با افزایش عمق، مقدار DPI کاهش یافته و از عمقی به بعد، مقدار آن ثابت شده و در ادامه، بدون تغییر باقی می‌ماند. در این پژوهش، به عمقی که از آن به بعد، مقدار DPI ثابت شده‌است، عمق بحرانی گفته می‌شود و این عمق، با یک ستاره قرمز در شکل ۳ نشان داده شده‌است. خاطر نشان می‌شود این پدیده در شمع‌های کوبشی در خاک یکنواخت هم مشاهده شده‌است که در بخش ۴-۵ توضیحات لازم ارائه خواهد شد. شایان ذکر است اولین نقطه ثبت داده‌ها از سطح لایه نبوده است که دلیل آن، فرورفتن دستگاه تحت وزن خود به داخل لایه خاک و بدون اعمال هیچ گونه ضربه‌ای بوده است. همچنین، مشاهده می‌شود هرچه قطر مخروط بزرگتر باشد، مقدار فرورفت آن به لایه خاک کمتر می‌شود که دلیل آن، ناشی از کاهش تنش اعمالی از طرف ضربه و در نتیجه، فرورفت کمتر است. از مقایسه این سه نمودار، همچنین می‌توان دریافت که طبق انتظار، هرچه تراکم لایه خاک بیشتر باشد، مقدار DPI بدست آمده کمتر است. این مشاهده در تطابق با نتایج کارهای دیگران نظیر [۱۲، ۱۶، ۱۹] نیز است.

#### ۴- نتایج و بحث

به دلیل متغیر بودن مقدار DPI با عمق، به راحتی نمی‌توان مشخصه‌های لایه‌ها را باهم مقایسه نمود. راهکار آن، استفاده از مقدار میانگین شاخص نفوذ دینامیکی است. طبق نتایج پژوهش آلبرایت [۲۰]، استفاده از میانگین وزنی برای نتایج آزمون‌های نفوذی دارای انحراف معیار کمتری نسبت به استفاده از میانگین حسابی است. لذا در این پژوهش (و نیز مشابه پژوهش محمدی و همکاران [۱۶])، از میانگین وزنی DPI نسبت به عمق استفاده می‌شود. در این صورت، میانگین وزنی شاخص نفوذ دینامیکی ( $DPI_{wt\ avg}$ ) برابر است با:

$$DPI_{wt\ avg} = \frac{1}{H} \sum_1^N [(DPI)_i \cdot (Z)_i] \quad (2)$$

در رابطه‌ی بالا، H عمق نهایی نفوذ و  $Z_i$  عمق نفوذ مخروط است که در آن،  $DPI_i$  در ضربه  $\alpha$ م به دست آمده است. در صورت اندازه‌گیری  $Z_i$  به ازای هر تک ضربه چکش داریم:  $DPI_i = Z_i$  و



شکل ۴. تغییرات شاخص نفوذ وزنی با قطر مخروط در وزن چکش‌های مختلف در تراکم نسبی: الف) ۱۰۰ درجه ب) ۸۰ درصد پ) ۵۵ درصد  
**Fig. 4. Variation of average weighted DPI with the cone diameter for different hammer masses with relative density of: a) 100%, b) 80%, c) 55%**

می‌شود و روند آن، تقریباً خطی است. هرچه تراکم خاک بیشتر باشد، مقدار  $DPI_{w, avg}$  کمتری حاصل شده‌است.

با توجه به یکسان بودن قطر مخروط در این آزمون‌ها، می‌توان گفت مقدار  $DPI_{w, avg}$  فقط تابعی از تصویر سطح مقطع مخروط نوک است. این نکته در خصوص ظرفیت باربری شمع‌های کوبشی نیز قبلاً مشاهده است، به طوری که در روابط ظرفیت باربری نوک شمع‌ها که توسط رندولف و همکاران [۲۱] و میرهوف [۲۲] ارائه شده‌اند، سطح مقطع تصویر شده نوک که مستقل از زاویه نوک مخروط است و تنها به قاعده شکل شمع بستگی دارد، به عنوان سطح مؤثر در ظرفیت انتهایی شمع ذکر شده‌است.

#### ۳-۴- انرژی کوبش

سازوکار فرورفت مخروط به داخل خاک، ناشی از انرژی اعمالی به آن است. این انرژی از نوع جنبشی بوده و ناشی از وزن چکش و ارتفاع سقوط ( $h$ ) آن است. مقدار انرژی به صورت حاصل ضرب وزن در ارتفاع سقوط به صورت  $E = Mgh$  بدست می‌آید که در آن،  $g$  جاذبه زمین است. برای تمام آزمون‌ها (با درجات مختلف تراکم خاک) با زاویه رأس ۶۰ درجه، مقدار  $DPI_{w, avg}$  و انرژی متناظر بدست آمده و تغییرات نسبت  $DPI_{w, avg} / E$  با قطرهای مختلف در شکل ۶ نشان

#### جدول ۳. مقادیر ضرایب $\alpha$ و $\beta$

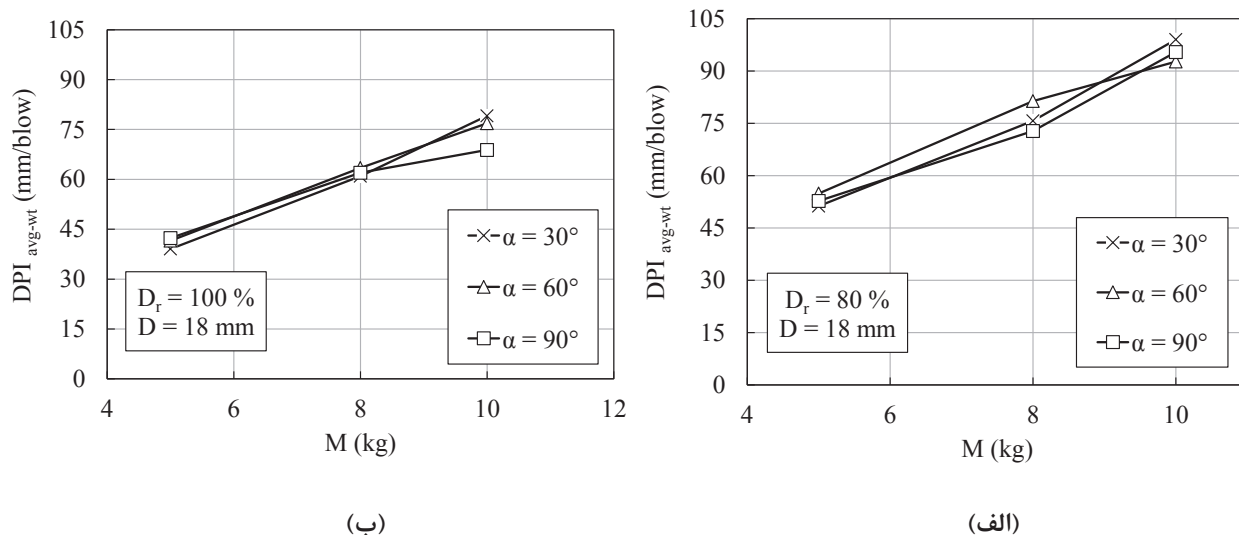
**Table 3. Values of coefficients of  $\alpha$  and  $\beta$**

تراکم نسبی (درصد)	ضرایب	جرم چکش (کیلوگرم)			$(R^2)$
		۵	۸	۱۰	
۱۰۰	$\alpha$	۱/۱۵	۱/۶۲	۱/۷۸	۰/۹۹
	$\beta$	۶۲/۰۷	۹۲/۴۷	۱۰۸/۷۴	
۸۰	A	۱/۶۹	۲/۲۴	۲/۴۲	۰/۹۸
	B	۸۳/۸۰	۱۲۰/۴۴	۱۳۸/۰۲	
۵۵	A	۳/۶۱	۱/۳۴	۰/۹۶	۰/۹۷
	B	۱۵۶/۶۶	۱۰۷/۲۲	۱۰۵/۰۶	

#### ۴-۲- زاویه نوک مخروط

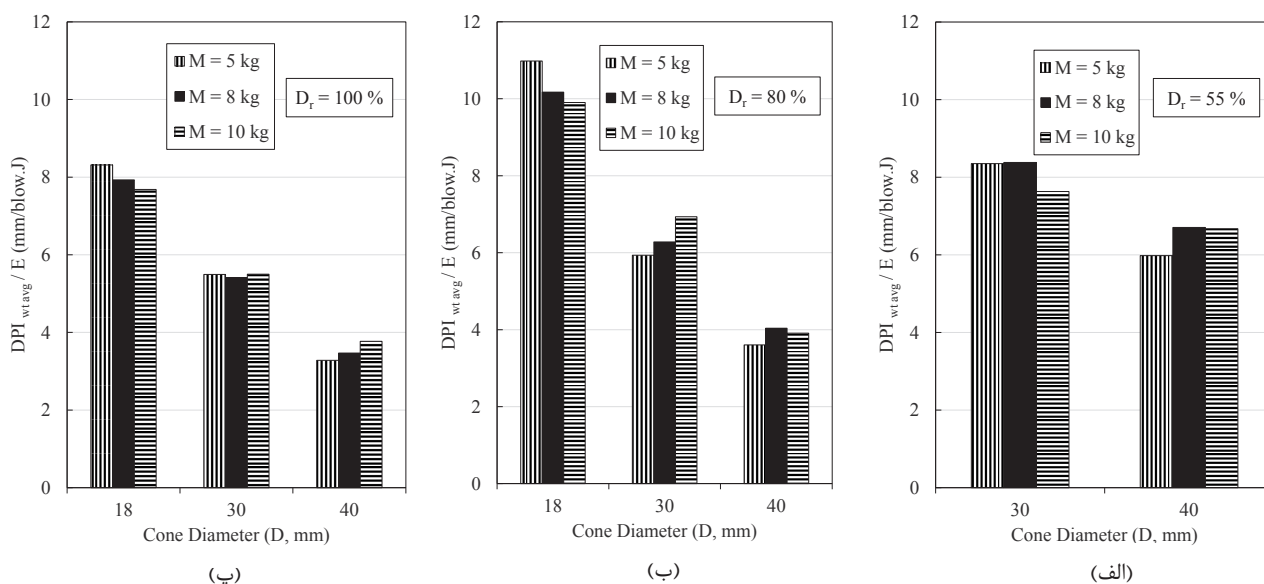
با در نظر گرفتن زوایای رأس مختلف برای مخروط برابر با ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه، نتایج آزمون‌های با وزن‌های مختلف چکش و قطر مخروط  $D=18 \text{ mm}$  و برای دو درجه تراکم خاک ۸۰ و ۱۰۰ درصد، مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج بر حسب  $DPI_{w, avg}$  در برابر وزن چکش در شکل ۴ نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از مخروط‌ها با زوایای مختلف همگی روی یکدیگر قرار گرفته‌اند؛ به عبارت دیگر، می‌توان گفت زاویه رأس مخروط نقشی در نتایج آزمون نفوذی نداشته است. همچنین، مطابق شکل ۵ مشاهده می‌شود طبق انتظار، مقدار  $DPI_{w, avg}$  با افزایش وزن چکش بزرگتر





شکل ۵. تغییرات میانگین وزنی شاخص نفوذ دینامیکی با وزن چکش در زاویه های مختلف نوک مخروط و قطر مخروط ۱۸ میلی‌متر در تراکم نسبی: الف) ۱۰۰ درصد، ب) ۸۰ درصد

Fig. 5. Variation of DPIwt-avg with hammer mass for different cone apex angles and come diameter of 18 mm with  $D_r$  of: a) 100%, b) 80%



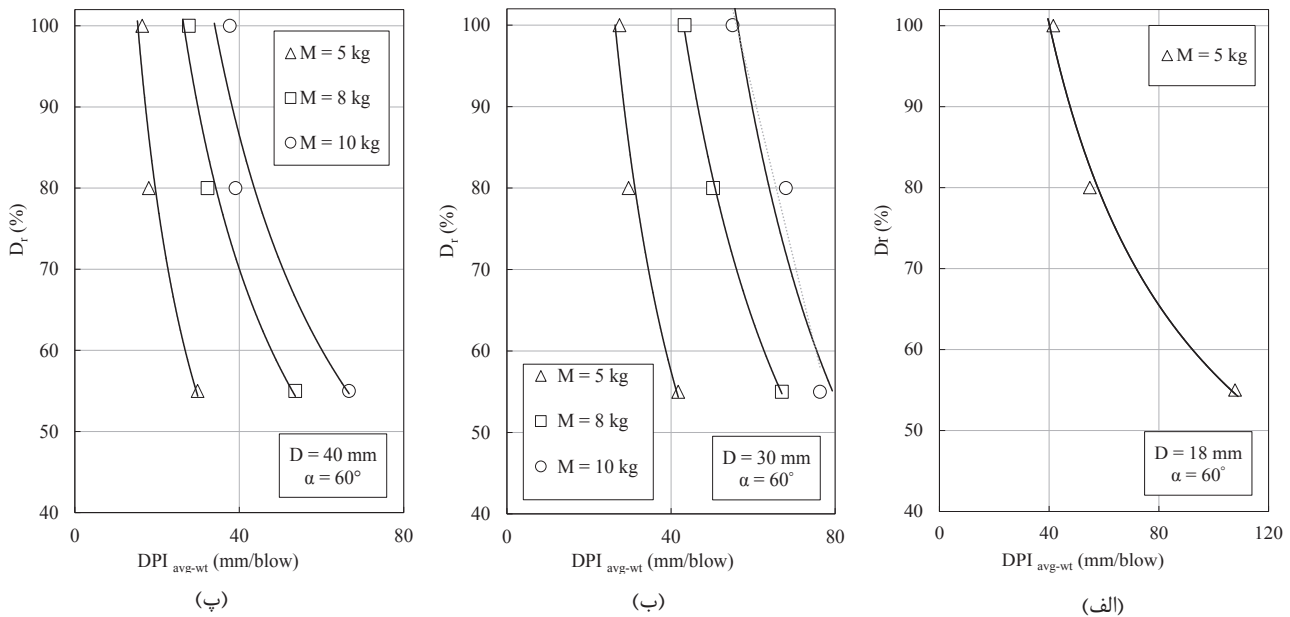
شکل ۶. مقادیر نسبت میانگین وزنی شاخص نفوذ دینامیکی به انرژی اعمالی در قطرهای مختلف و زاویه نوک مخروط ۶۰ درجه برای تراکم نسبی: الف) ۱۰۰ درصد، ب) ۸۰ درصد، پ) ۵۵ درصد

Fig. 6. Values of the ratio of DPIwt-avg to applied energy with different cone diameters and cone apex angle of 60 with  $D_r$  of: a) 100%, b) 80%, c) 55%

خاطر نشان می شود این نتیجه قبلاً توسط اشمرتمن و پالاسیوس [۲۳] جهت اصلاح تعداد ضربات در آزمون SPT برای نسبت انرژی های انتقالی مختلف بیان شده است. لذا، می توان گفت در آزمون های نفوذی، مقدار نفوذ به نسبت انرژی به کار گرفته شده به صورت خطی اصلاح می شود.

داده شده است. یادآوری می شود در تراکم نسبی ۵۵٪، انجام آزمون با کوچکترین قطر امکان پذیر نبود. طبق نتایج مندرج در شکل ۶، مشاهده می شود که برای هر قطر ثابت مخروط (و در نتیجه سطح مقطع تصویر شده ثابت)، نسبت  $DPI_{wt-avg} / E$  تقریباً یکسان است؛ به عبارت دیگر، می توان نوشت:

$$\frac{(DPI_{wt-avg})_1}{E_1} = \frac{(DPI_{wt-avg})_2}{E_2} = cte \quad (5)$$



شکل ۷. تغییرات تراکم نسبی خاک با میانگین وزنی شاخص نفوذ دینامیکی برای وزن های مختلف چکش و قطر مخروط: الف) ۱۸ میلی متر ب) ۳۰ میلی متر ج) ۴۰ میلی متر

Fig. 7. Variation of soil relative density with average weighted DPI with different hammer masses and cone diameter of: a) 18mm, b) 30mm, c) 40mm

$R^2 \sim 0.9$ ) بر روی یک خط قرار گرفته اند. به عبارت دیگر، برای تمامی انرژی های کوبش در یک قطر مشخص می توان یک رابطه جهت تعیین تراکم نسبی خاک ماسه ای ارائه نمود. در جدول ۴، رابطه میان تراکم نسبی، انرژی کوبش و میانگین وزنی شاخص نفوذ ارائه شده است.

#### ۴-۵- عمق نفوذ بحرانی و زاویه اصطکاک داخلی خاک

همان طور که قبلاً در توضیح شکل ۲ اشاره شد، مقدار شاخص نفوذ دینامیکی (DPI) با رسیدن به یک عمقی ثابت می شود. این پدیده به طور مشابه در حین عملیات کوبش شمع نیز مشاهده شده است که به آن عمق، عمق نفوذ بحرانی (ZCR) گفته می شود.

جدول ۴. رابطه میان تراکم نسبی و نسبت انرژی کوبش به میانگین وزنی شاخص نفوذ

Table. 4. Relationship between the relative density and normalized weighted DPI

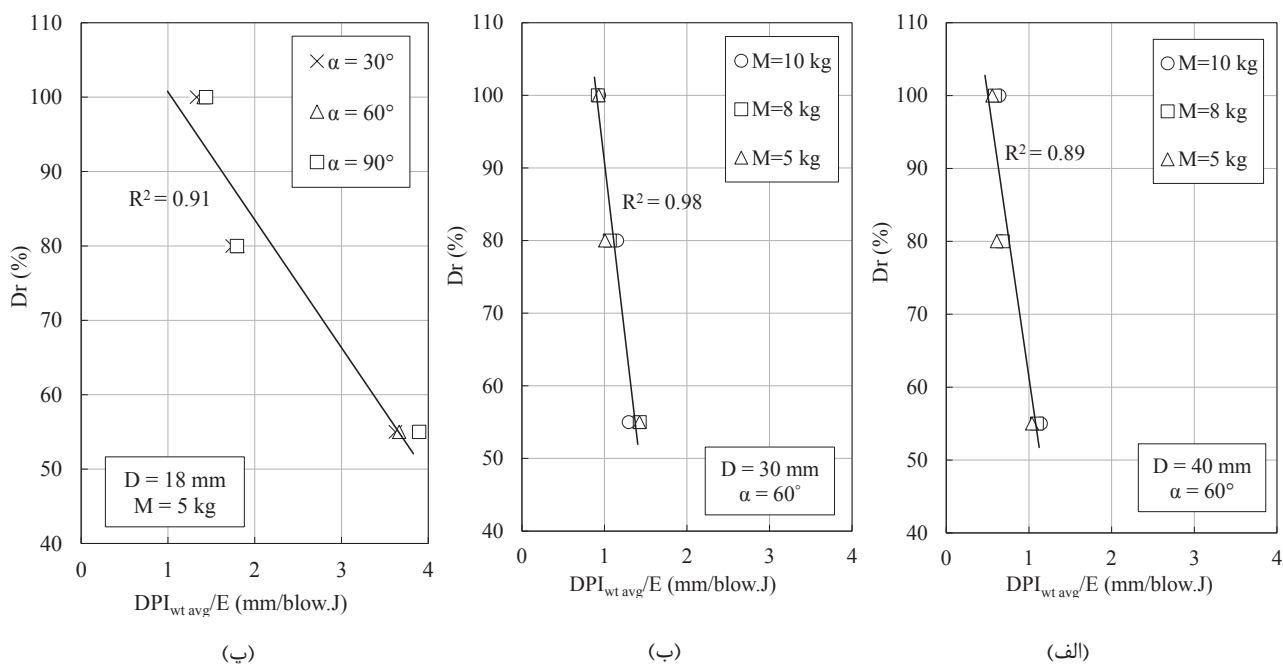
رابطه	قطر مخروط نفوذ (میلی متر)
$D_r(\%) = -17.2 \text{ DPI}_{\text{avg-wt}}/E + 117.9$	۱۸
$D_r(\%) = -96.5 \text{ DPI}_{\text{avg-wt}}/E + 187.3$	۳۰
$D_r(\%) = -77.8 \text{ DPI}_{\text{avg-wt}}/E + 139.2$	۴۰

#### ۴-۴- تراکم نسبی

مقدار تراکم نسبی لایه های خاک در مقابل  $DPI_{w, \text{avg}}$  برای وزن های مختلف چکش و مخروط با زاویه رأس ۶۰ درجه و قطرهای ۱۸، ۳۰ و ۴۰ میلی متر در شکل ۷ رسم شده است. مشاهده می گردد با افزایش تراکم نسبی لایه، مقدار  $DPI_{w, \text{avg}}$  کاهش می یابد. البته آن تغییرات خطی نبوده، بلکه به صورت منحنی است. شایان ذکر است با بررسی داده ها و برازش چندین خط از میان نتایج، می توان گفت تراکم نسبی با  $DPI_{w, \text{avg}}$  یک رابطه توانی دارد. شایان ذکر است نتیجه مشابهی در پژوهش محمدی و همکاران [۱۶] و خدایپرست [۲۴] نیز به دست آمده که بر روی آزمون DCP انجام شده بود. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، از قطرهای و انرژی های مختلف استفاده شده است، از ارائه روابط توانی برای هر یک از نتایج پرهیز می شود و در عوض، سعی می شود تا رابطه کلی تری در ادامه بیان گردد.

با توجه به ارتباط مستقیم میان میانگین وزنی شاخص نفوذ و انرژی کوبش طبق رابطه ۵، تغییرات تراکم نسبی بر حسب نسبت انرژی کوبش به میانگین وزنی شاخص نفوذ ( $DPI_{\text{wt-avg}}/E$ ) برای سه قطر مختلف مخروط و انرژی های متفاوت در شکل ۸ رسم شده است. مشاهده می شود داده ها با دقت مناسبی (ضریب رگرسیون حدود





شکل ۸. نمودار تغییرات تراکم نسبی با نسبت انرژی کوبش به میانگین وزنی شاخص نفوذ در مخروط نفوذ با قطر (الف) ۱۸ میلی‌متر (ب) ۳۰ میلی‌متر (پ) ۴۰ میلی‌متر

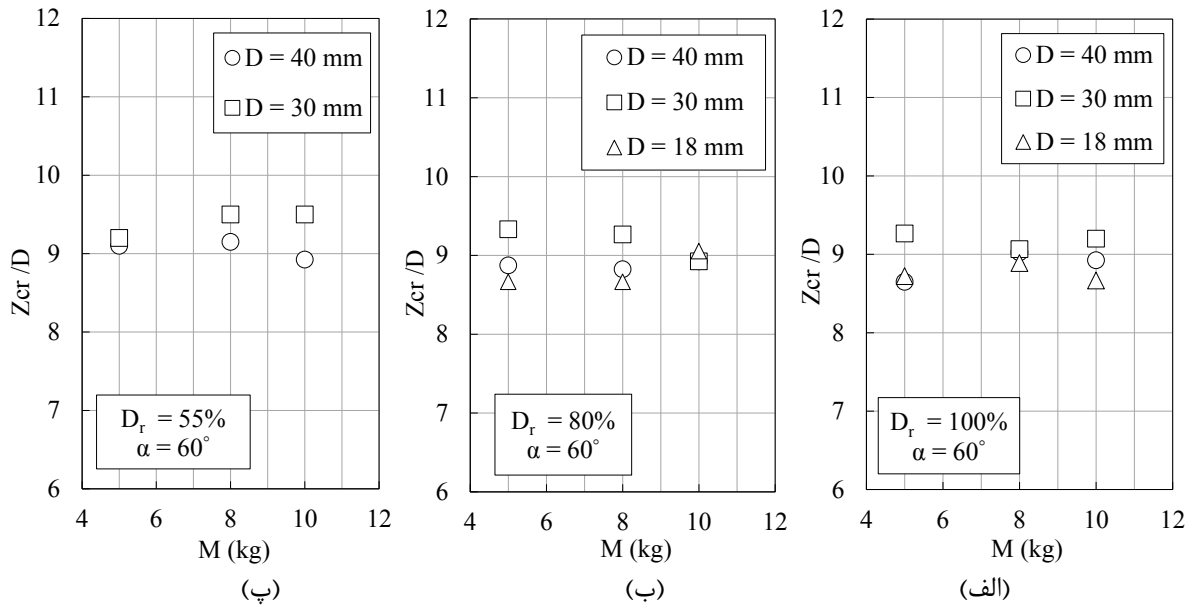
Fig. 8. Variation of relative density with the normalized DPIwt-avg with the cone diameter of: a) 18mm, b) 30mm, c) 40mm

وزن چکش به دست آمده است. بر اساس داده‌های میدانی و ظرفیت باربری شمع‌های کوبشی، میرهوف [۲۲] رابطه‌ای میان زاویه اصطکاک داخلی خاک و عمق بحرانی شمع مطابق رابطه‌ی ۶ ارائه کرده است. شایان ذکر است با توجه به ضربات ناشی از شمع به خاک اطراف و تغییر شکل‌های بزرگ، زاویه اصطکاک داخلی خاک از نوع باقیمانده ( $\phi_{res}$ ) است.

$$\phi_{res} = 11.765 \ln\left(\frac{Z_{cr}}{D}\right) + 6.9057 \quad (6)$$

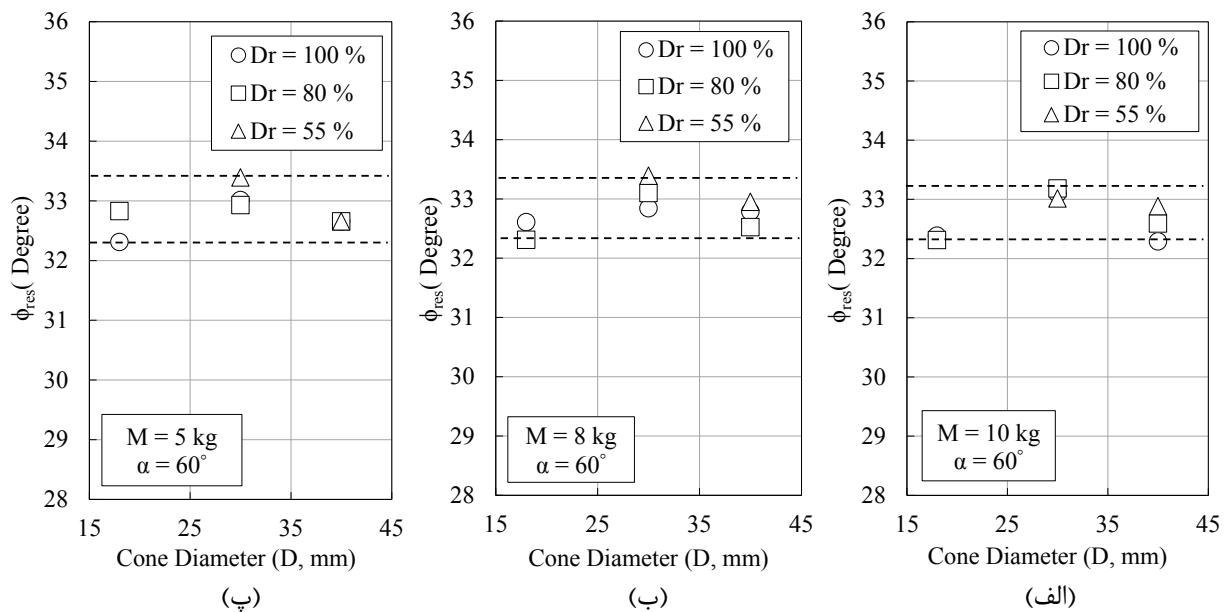
از این رابطه، جهت تخمین زاویه اصطکاک داخلی ماسه مورد استفاده در آزمون‌های MDP این پژوهش استفاده گردید که نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه شده است. مشاهده می‌شود زاویه اصطکاک داخلی باقیمانده ماسه فیروزکوه در بازه  $\phi_{res} = 32.3 \sim 33.33$  بدست آمده است. خاطرنشان می‌شود طبق جدول ۲، مقدار زاویه اصطکاک داخلی باقیمانده این خاک برابر با ۳۳ درجه به دست آمده که نشان از تطابق خوب میان نتایج این آزمون نفوذی با آزمون آزمایشگاهی برش مستقیم دارد؛ به عبارت دیگر، با بکارگیری آزمون نفوذی MDP، زاویه اصطکاک داخلی باقیمانده خاک با دقت مناسب (کمتر از خطای نسبی چهار درصد) تخمین زده شده است.

به عبارت دیگر، مطابق با نتایج میدانی، مشاهده شده است که در یک خاک یکنواخت، ظرفیت باربری شمع کوبشی از عمقی به بعد، تغییر نمی‌کند. میرهوف [۲۲] در پژوهش خود به عدم اثر انرژی کوبش در عمق نفوذ بحرانی اشاره کرده است. به همین دلیل، در روابط تحلیلی ظرفیت باربری که توسط میرهوف [۲۲] ارائه شده و مرجع مهمی در طراحی شمع‌های کوبشی محسوب می‌شود، مقدار ظرفیت باربری نوک و جدار شمع با رسیدن به یک مقدار مشخص (که تابعی از عمق است)، ثابت در نظر گرفته شده است. مشابه آن چه در تحقیقات گذشتگان نیز اشاره شده است (نظیر رندولف و همکاران [۲۱]، و سیک [۲۵] و سالگادو و همکاران [۲۶]) مکانیزم فرورفتن نوک نفوذگر بداخل زمین تحت ضربه مشابه مکانیزم عملیات شمع کوبشی است. در این پژوهش، مقدار عمق بحرانی در این آزمون‌ها تخمین زده شده است، به طوری که در فاصله یک برابر قطر مخروط، تغییرات DPI کمتر از دو میلی‌متر بر ضربه باشد. طبق نظر بورنهام [۲۷]، انحراف معیار مناسب برای DCP، کم‌تر از دو میلی‌متر گزارش شده و بطور مشابه، برای آزمون این پژوهش (MDP) نیز استفاده شده است. در شکل ۹، نسبت  $Z_{cr}/D$  در مقابل وزن چکش برای آزمون‌های مختلف رسم شده است. مشاهده می‌شود مقدار نسبت  $Z_{cr}/D$  میان ۸/۵ و ۹/۵ با متوسط  $Z_{cr}/D = 9$  و بدون وابستگی به درجه تراکم خاک و



شکل ۹. تغییرات نسبت عمق بحرانی به قطر مخروط در برابر وزن های مختلف چکش با زاویه نوک مخروط ۶۰ درجه و تراکم نسبی: الف) ۱۰۰ درصد، ۸۰ درصد و ب) ۵۵ درصد

Fig. 9. The ratio of critical depth to the cone diameter along with different hammer masses and cone apex angle of 60° and  $D_r$  of: a) 100%, b) 80%, c) 55%



شکل ۱۰. تخمین زاویه اصطکاک داخلی باقیمانده خاک ماسه‌ای با قطرهای مخروط و درصد تراکم مختلف خاک در وزن چکش الف) ۱۰ کیلوگرم، ب) هشت کیلوگرم، پ) پنج کیلوگرم

Fig. 10. Estimation of sand internal friction angle with various cone diameters and soil relative densities with hammer mass of: a) 10kg, b) 8kg, c) 5kg

در سطح ملی ثبت اختراع شده و دارای تأیید علمی است. مشابه آزمون‌های نفوذی دیگر، دستگاه MDP از یک مخروط نفوذی، میله رابط و یک چکش تشکیل شده‌است. ابعاد و هندسه دستگاه MDP نسبت به دستگاه‌های دیگر موجود در ادبیات فنی (نظیر DPL و

##### ۵- خلاصه و جمع‌بندی

در این پژوهش، به مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف دخیل در یک آزمون نفوذی پرداخته شده‌است. دستگاه مورد استفاده در این پژوهش، دستگاه نفوذگر ضربه‌ای دستی (MDP) نام دارد که

- Characterization Using the Dynamic Cone Penetrometer, Minnesota Department of Transportation, 1993.
- [4] A. Scala, Simple Methods of Flexible Pavement Design Using Cone Penetrometers, New Zealand Engineering, 11(2) (1956) 34.
- [5] S.L. Webster, R.H. Grau, T.P. Williams, Description and Application of Dual Mass Dynamic Cone Penetrometer, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, 1992.
- [6] ASTM., ASTM D6951-03, Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications, in, ASTM International, West Conshohocken, 2003.
- [7] C.R. Clayton, M.C. Matthews, N.E. Simons, Site investigation: A handbook for engineers, Blackwell Science, 1995.
- [8] A. Fakher, M. Khodaparast, C. Jones, The use of the Mackintosh Probe for site investigation in soft soils, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 39(2) (2006) 189-196.
- [9] M. Khodaparast, A. Rajabi, M. Mohammadi, The new empirical formula based on dynamic probing test results in fine cohesive soils, International Journal of Civil Engineering, 13(2) (2015).
- [10] K. George, W. Uddin, Subgrade Characterization for Highway Pavement Design, Federal Highway Administration, Mississippi, 2000.
- [11] D. Mohammadi, Development of Dynamic Cone Penetrometer (DCP) to determine engineering soil parameters in sand, Tarbiat Modarres University, 2008.
- [12] E. Kianirad, Development and Testing of a PorTable. In-Situ Near-Surface Soil Characterization System, Northeastern University, Boston, Massachusetts, 2011.
- [13] F. Amini, Potential Applications of the Static and Dynamic Cone Penetrometers in MDOT Pavement Design and Construction, Federal Highway Administration, Jackson, Mississippi, 2003.
- [14] E. Seyedi Hosseininia, Manual Dynamic Penetrometer, in: Document and Real Estate Organization (Ed.), Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 2017. (In Persian)
- (DCP) طوری انتخاب شده است تا قدرت نفوذ و انرژی بیشتری به مخروط نفوذی اعمال شود. به جهت مطالعه و بررسی بیشتر دستگاه MDP، هندسه اجزای این دستگاه تغییر داده شده و انواع مخروط نفوذی با زاویه رأس و قطر مختلف و انواع وزن چکش ساخته شد. خاک مورد استفاده در این پژوهش، ماسه فیروزکوه ۱۶۱ (به صورت بدانه بندی شده) در حالت خشک و با تراکم‌های نسبی ۵۵، ۸۰ و ۱۰۰ درصد مورد استفاده قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج این پژوهش بر اساس مطالعات آزمایشگاهی عبارتند از:
- \* با افزایش قطر مخروط، شاخص نفوذ دینامیکی (بر حسب میلی‌متر بر ضربه) کمتر شده است که دلیل آن، می‌تواند بخاطر کاهش انرژی اعمالی به مخروط نفوذی باشد.
- \* شکل هندسی مخروط (زاویه رأس) تأثیری بر نتیجه ضربه-فرورفت نداشته است.
- \* رابطه مستقیمی میان میانگین شاخص نفوذ دینامیکی ( ) و انرژی اعمالی به مخروط مشاهده شده است.
- \* در این پژوهش، درجه تراکم نسبی خاک بر حسب میانگین شاخص نفوذ دینامیکی ( ) تخمین زده شد. بدین منظور، برای محدوده خاک مورد استفاده در این تحقیق، روابطی کاربردی ارائه شدند.
- \* با توجه به تشابه سازوکار دستگاه MDP با عملیات کوبش شمع، می‌توان زاویه اصطکاک داخلی خاک (باقیمانده) را بر اساس عمق بحرانی تخمین زد.
- به عنوان پیشنهاداتی برای توسعه این پژوهش، می‌توان به اثر نوع خاک (درشت دانه و ریزدانه) و همچنین، اثر دانه بندی بر روی نتایج اشاره کرد.

## مراجع

- [1] E. Kleyn, J. Maree, P.F. Savage, Application of a porTable. pavement dynamic cone penetrometer to determine in situ bearing properties of road pavement layers and subgrades in South Africa, in: Proc. 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, 1982, pp. 277-282.
- [2] DIN., DIN 4094-3, Subsoil - Field testing - Part 3: Dynamic Probing, in, Deutsch, 2002.
- [3] T. Burnham, D. Johnson, In Situ Foundation

- Instruments, University of Wisconsin, Madison, 2002.
- [21] M. Randolph, R. Dolwin, R. Beck, Design of driven piles in sand, *Géotechnique*, 44(3) (1994) 427-448.
- [22] G. Mayerhof, Bearing capacity and settlement of pile foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 102(3) (1976) 195-228.
- [23] J.H. Schmertmann, A. Palacios, Energy dynamics of SPT, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(8) (1979) 909-926.
- [24] M. Khodaparast, Application of Dynamic Cone penetrometer in determining the relative density and undrained shear strength of fine-grained soils, *Engineering Geology*, 9(1) (2015) 2633-2652 (In Persian).
- [25] A.B. Vesic, Bearing capacity of deep foundations in sand, 1963.
- [26] R. Salgado, J. Mitchell, M. Jamiolkowski, Cavity expansion and penetration resistance in sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(4) (1997) 344-354.
- [27] T.R. Burnham, Application of dynamic cone penetrometer to Minnesota department of transportation pavement assessment procedures, Minnesota Department of Transportation, Office of Research Administration, Minnesota, 1997.
- [15] ASTM., ASTM D698-12 Test Methods for Moisture-Density Relations of Soils and Soil-Aggregate Mixtures, in: Method A (Standard Proctor), Astm International., West Conshohocken, 2012.
- [16] S. Mohammadi, M. Nikoudel, H. Rahimi, M. Khamsehchiyan, Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for Determination of the Engineering Parameters of Sandy Soils, *Engineering Geology*, 101(3-4) (2008) 195-203.
- [17] S.L. Webster, R.W. Brown, J.R. Porter, Force Projection Site Evaluation Using the Electric Cone Penetrometer (ECP) and the Dynamic Cone Penetrometer (DCP), Army Engineer Waterways Experiment Station VICKSBURG MS Geotechnical LAB, 1994.
- [18] M. Livneh, Friction Correction Equation for the Dynamic Cone Penetrometer in Subsoil Strength Testing, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1714) (2000) 89-97.
- [19] A. Sawangsuriya, T.B. Edil, Evaluating Stiffness and Strength of Pavement Materials, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 158(4) (2005) 217-230.
- [20] R.L. Allbright, Evaluation of the Dynamic Cone Penetrometer and its Correlations with other Field

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Sardar, E. Seyedi Hosseininia, *Effective Factors on the Results of Geotechnical Penetration Tests by Using Manual Dynamic Penetrometer (MDP) in Sandy Soil, Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(4) (2021): 1295-1306.

DOI: [10.22060/ceej.2020.16856.6375](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16856.6375)

