

بررسی آزمایشگاهی اثر قوس زدگی در مصالح دانه‌ای به کمک دستگاه توسعه یافته دریچه*

علی احمدی^(۱) سید احسان سیدی حسینی نیا^(۲)

چکیده این مقاله به بررسی آزمایشگاهی اثر قوس زدگی به صورت ایجاد ساختاری به شکل قوس پایدار در مصالح دانه‌ای پرداخته است. بدین منظور یک دستگاه توسعه یافته دریچه ساخته شده و به کمک آن ابعاد قوس ایجاد شده در مصالح دانه‌ای برحسب زاویه اصطکاک داخلی، قطر متوسط و زاویه قرارگیری بستر مصالح مورد پژوهش قرار گرفته است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که برای همه مصالح مورد آزمایش با افزایش عرض دریچه و کاهش زاویه قرارگیری بستر مصالح دانه‌ای، عرض و ارتفاع قوس تشکیل شده افزایش می‌یابد و شکل تمامی قوس‌ها به صورت یک سهمی است. از طرفی به ازای یک عرض دریچه و زاویه بستر ثابت، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چگالی مصالح دانه‌ای، ارتفاع و عرض قوس افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی قوس زدگی؛ مصالح دانه‌ای؛ دریچه؛ زاویه بستر؛ شکل قوس.

Experimental Investigation on the Arching Effect in Granular Materials by Using the Developed Trapdoor Apparatus

A. Ahmadi S. E. Seyedi Hosseininia

Abstract This paper discusses the arching effect as the formation of a stable arch in granular materials. For this aim, a developed trapdoor apparatus is designed in order to investigate the arch dimensions in term of the internal friction angle, average size and base angle of materials. Observations show that for all tested granular ensembles, width and height of the arch increase with an increase in trapdoor width and a decrease in base angle. It is also found that the shape of the whole arches is governed by a parabola. In addition, for both constant values of trapdoor width and base angle, the increase in both the internal friction angle and density of granular materials leads to the increase in arch dimensions.

Keywords Arching; Granular Materials; Trapdoor; Base angle; Arch width; Arch height.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۱۰/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۴/۲ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

بر روی کلیه زوایا شامل صفر تا ۹۰ درجه نسبت به افق قابل تنظیم است و دریچه‌ای متحرک با قابلیت باز شدن تا میزان دلخواه دارد. با استفاده از این دستگاه می‌توان حداکثر عرض دریچه را که بر روی آن قوس زدگی ایجاد می‌شود، به دست آورد.

در ارائه این مقاله، با کمک نتایج حاصل از انجام چندین آزمون بر روی مصالح دانه‌ای با دستگاه ساخته شده، ارتباط ابعاد قوس ایجاد شده به‌ازای عرض دریچه و زاویه بستر مصالح دانه‌ای نسبت به افق بررسی می‌شود. همچنین، سعی بر آن است تا پارامترهای مؤثر در قوس زدگی شناخته شوند و رابطه‌ای برای توصیف شکل هندسی ناحیه قوس زدگی در مصالح دانه‌ای به دست آید.

آشنایی با آزمون دریچه و علت انتخاب این روش

یکی از روش‌های بررسی اثر قوس زدگی در مصالح دانه‌ای، استفاده از آزمون آزمایشگاهی دریچه است. هدف اصلی این آزمون که نخستین بار توسط ترزاقی [16] ابداع شد، مطالعه بر روی قوس زدگی در مصالح دانه‌ای به‌عنوان ماهیت انتقال فشار در مصالح تشکیل‌دهنده محیط می‌باشد. شکل ناحیه‌ای از محیط دانه‌ای که در آن توده مصالح تحت انتقال فشار قرار گرفته‌اند، شبیه به یک قوس است و نام قوس زدگی برای این پدیده انتخاب شده است. در هیچ یک از این آزمایش‌ها که با هدف بررسی اثر قوس زدگی به‌عنوان انتقال فشار در توده مصالح دانه‌ای انجام شده، دریچه به‌طور کامل برداشته نشده است. نخستین بار گو و ژو [۱۵] با برداشتن کامل دریچه به مطالعه قوس زدگی در حالت کرنش مستوی پرداختند و توانستند تعریف جدیدی برای پدیده قوس زدگی ارائه نمایند. مطابق تعریف [15] قوس زدگی عبارت است از تشکیل یک ساختار پایدار قوسی شکل خودایستا در مصالح به‌نحوی که این قوس دارای یک سطح آزاد از تنش باشد. به بیان دیگر، هیچ‌گونه تکیه‌گاه خارجی این قوس را تحمل نمی‌کند. در

پدیده قوس زدگی (arching) یکی از متداول‌ترین پدیده‌های موجود در مصالح دانه‌ای است. ترزاقی [1] قوس زدگی را به‌صورت انتقال فشار از یک توده خاک به بخش‌های پایدار مجاور تعریف کرد که ناشی از بسیج‌شدگی مقاومت برشی بین ذرات است که در واقع حاصل جابه‌جایی نسبی ذرات در مصالح دانه‌ای می‌باشد. او با ابداع دستگاه آزمایش دریچه (trapdoor apparatus) به تفسیر اثر قوس زدگی به‌معنای انتقال فشار پرداخت. با بهره‌گیری از این ایده، پژوهش‌های بسیاری برای شناخت اثر قوس زدگی در مسائل گوناگون مهندسی از جمله انتقال بار در سازه دیوار نگهدارنده [2]، تحلیل و طراحی تونل‌ها [3-7]، مقاومت باربری شمع‌ها [8]، نشست خاکریزهای متکی به شمع [9]، بار موجود بر روی سازه‌های زیرزمینی و مدفون در خاک [10-12] و جریان دانه‌ای در قیف‌ها و سیلوها [13] انجام شده است. برای آشنایی بیشتر با پدیده قوس زدگی مطالعه مرجع [14] پیشنهاد می‌شود. در تمامی موارد ذکر شده، به دلیل آن‌که منطقه تحت تأثیر انتقال فشار به‌شکل یک قوس یا کمان می‌باشد، نام قوس زدگی برای این پدیده انتخاب شده است. با این وجود، اثر قوس زدگی به‌معنای ایجاد ساختاری پایدار به‌صورت یک قوس نیز قابل تعریف است. برای نشان دادن این مفهوم در مصالح دانه‌ای، گو و ژو [15] با اصلاح دستگاه دریچه ترزاقی، دستگاهی طراحی کردند که می‌توانست امکان تشکیل قوس در برخی از مصالح دانه‌ای را مدل‌سازی کند. قرارگیری بستر مصالح فقط بر روی زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق و استفاده از تعدادی دریچه با عرض ثابت، جزو محدودیت‌های این دستگاه شمرده می‌شود. با بهره‌گیری از این ایده و برای رفع این محدودیت‌ها، یک دستگاه طراحی و ساخته شده است که می‌تواند امکان تشکیل قوس در مصالح دانه‌ای گوناگون دارای ذراتی با قطرهای دلخواه را فراهم نماید. از سوی دیگر، بستر مصالح در این دستگاه

- شانه جانبی: دو قطعه چوبی قائم مکعب مستطیل شکل به ابعاد $3/5 \times 5 \times 41/5$ سانتی متر که دارای شیار بی به اندازه ضخامت شیشه ضدضربه هستند.

- مخزن مصالح تخلیه شده: مصالح پس از تخلیه درون آن وارد شده و در محیط پیرامون دستگاه پراکنده نمی شوند.

- ریل های افقی: دو قطعه چوبی افقی مدرج به ابعاد $3/5 \times 5/3 \times 19/8$ سانتی متر که دقیقاً در تراز بین دو شانه جانبی و مخزن مصالح تخلیه شده قرار می گیرند.

- جعبه نگهداری مصالح دانه ای: این جعبه در حقیقت فضای محدود به تخته چوب ملامینه (بستر اصلی دستگاه) از رویه تحتانی، شیشه ضدضربه از رویه فوقانی، دو قطعه شانه جانبی از طرفین، دو ریل افقی از پایین می باشد که از سمت بالایی برای ورود مصالح کاملاً باز است. اندازه ضخامت درونی جعبه برابر با قطر متوسط ذرات تشکیل دهنده مصالح دانه ای (d_{50}) به علاوه یک میلی متر فاصله جدایش برای به حداقل رساندن اصطکاک مصالح دانه ای با بستر اصلی و شیشه ضدضربه است.

بستر تکیه گاهی دستگاه. این قطعه که تحمل بار کل حاصل از بستر اصلی دستگاه را بر عهده دارد، یک تخته چوبی از جنس ملامینه به ابعاد 60×40 سانتی - متر است که بر روی دو پایه چوبی نصب شده است. بستر اصلی دستگاه از طریق یک قطعه لولای فولادی پنج سوراخه به ابعاد $1/3 \times 30$ سانتی متر متصل شده است. از طرفی وزن مجموعه تعبیه شده بر روی بستر اصلی، به وسیله دو قطعه فولادی به نام دستک شیاردار به بستر تکیه گاهی انتقال می یابد. جزئیات این قطعات فولادی در ادامه بیان شده است.

دستک های شیاردار. این دستک ها برای متحرک نمودن بستر اصلی دستگاه تعبیه شده اند. هر دستک از طریق یک سوراخ، بر روی بستر تکیه گاهی به طور ثابت

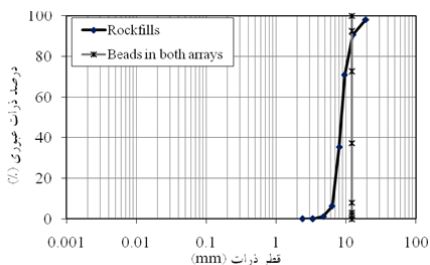
دستگاه ساخته شده، بستر نگهداری مصالح دانه ای به جای حالت قائم، دارای زاویه 30° درجه نسبت به افق است. این آزمون، فقط برای چند عرض ثابت دریچه انجام شده است. بنابراین باید این موارد را جزو محدودیت های دستگاه [15] دانست. در این تحقیق به منظور اصلاح و توسعه کاربرد آزمون دریچه، اسبابی به نام «دستگاه توسعه یافته دریچه» (Developed trapdoor apparatus) طراحی و ساخته شده است که دارای سه ویژگی متمایز نسبت به سایر دستگاه های آزمون دریچه است که در حال حاضر در جهان موجود می باشد؛ (۱) زاویه بستر نگهداری مصالح دانه ای می تواند در بازه زاویه صفر تا 90° درجه نسبت به افق تنظیم گردد. (۲) عرض دریچه بین صفر تا 30 سانتی متر می تواند تنظیم شود. (۳) ضخامت جعبه نگهداری مصالح با توجه به قطر ذرات مصالح دانه ای قابل تنظیم است. بنابراین، استفاده از این دستگاه توسعه یافته دریچه می تواند سبب شناخت بهتر پدیده قوس زدگی در مصالح دانه ای گردد.

ساختار دستگاه توسعه یافته آزمون دریچه

بخش های اصلی دستگاه آزمون دریچه شامل یک جعبه به عنوان مخزن نگهداری مصالح و یک باز شو با عرضی کوچک تر از عرض جعبه هستند. هدف از ساخت این دستگاه، توسعه دستگاه آزمون دریچه [15] موجود بود. طراحی و ساخت هر قطعه به همراه جزئیات آن به شرح زیر انجام شده است.

بستر اصلی دستگاه. تمامی قطعات مورد استفاده برای آماده سازی شرایط آزمون دریچه، بر روی یک تخته از جنس چوب ملامینه به ابعاد 60×40 سانتی متر و ضخامت $1/5$ سانتی متر نصب می شوند. این قطعات شامل موارد زیر هستند:

- شیشه ضدضربه: شیشه مقاوم ضدضربه که به عنوان لایه محافظ فوقانی جعبه نگهداری مصالح مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۳ منحنی دانه‌بندی مصالح دانه‌ای مورد استفاده

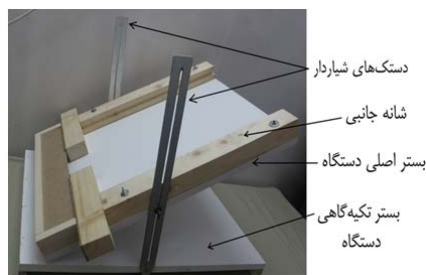
مجموعه گوی‌های پلاستیکی. گوی‌های پلاستیکی مجموعه‌ای از دانه‌های تسبیح با شکل هندسی بسیار نزدیک به کره هستند. هدف اصلی از انتخاب گوی‌های پلاستیکی بررسی و مقایسه اثر اندازه، جنس، چگالی، زاویه اصطکاک داخلی، نحوه آرایش یا چیدمان این ذرات با گوی‌های شیشه‌ای و ذرات ZrO_2 مورد استفاده در آزمون [15] به‌عنوان تفاوت‌های این دو آزمون است. قطر تمام دانه‌ها ۱۲ میلی‌متر است. برای استفاده از این مصالح و داشتن حالت‌های مختلف تراکمی، از چیدمان گوی‌ها در دو آرایش منظم استفاده شده است:

آرایش شل. در چیدمان آرایش شل ابتدا دانه‌ها در اولین ردیف ریخته می‌شوند و سپس هر دانه دقیقاً روی دانه ردیف زیرین گذاشته می‌شود و این روند تا پر شدن کامل جعبه ادامه می‌یابد. باید گفت که کوچک‌ترین ارتعاش مانند لرزش دست هنگام قرار دادن دانه‌ها بر روی یکدیگر سبب فروریزش دانه‌ها می‌گردد و باید کل کار را از نو آغاز کرد. به همین دلیل دستیابی به این آرایش کاری بس دشوار است و نیاز به تمرکز و دقت بالایی دارد، به‌طوری که پر کردن جعبه با این آرایش حدود ۹۰ دقیقه به طول می‌انجامد. جرم چگالی (ρ) توده گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل برابر با 0.97 گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست می‌آید.

با استفاده از دستورالعمل ارائه‌شده در مرجع [17] برای انجام آزمون تعیین زاویه آسایش، زاویه اصطکاک

پیچ شده است. بر روی هر پهلوی بستر اصلی، یک پیچ و مهره نصب شده است که داخل شیار مذکور قرار می‌گیرند و می‌توانند با حرکت درون این شیارها، بستر اصلی را بر روی هر زاویه دلخواهی نسبت به افق تنظیم نمایند. پس از آن که بستر اصلی بر روی زاویه دلخواه مستقر شد، مهره‌ها بسته می‌شوند تا بستر اصلی کاملاً در شیار قفل گردد و بر روی آن زاویه تثبیت شود.

شکل (۱) نمای جانبی از دستگاه توسعه‌یافته دریاچه و شکل (۲) نمای روبه‌رو از دستگاه توسعه‌یافته دریاچه را نشان می‌دهند.



شکل ۱ نمای جانبی از دستگاه توسعه‌یافته دریاچه



شکل ۲ نمای روبه‌رو از دستگاه توسعه‌یافته دریاچه

مصالح دانه‌ای مصرفی

مصالح دانه‌ای مورد استفاده در این آزمون شامل گوی‌های پلاستیکی و مجموعه‌ای از سنگریزه‌ها هستند که شکل (۳) منحنی دانه‌بندی آنها را نشان می‌دهد. برطبق شکل (۳) مقدار d_{50} برای گوی‌های پلاستیکی و مجموعه سنگریزه‌ها به‌ترتیب برابر ۱۲ میلی‌متر و ۹ میلی‌متر است.

آزمون مرجع [15] به دلیل استفاده از ماسه با درصد رطوبت ۲٪، چسبندگی کمی به خاطر اثر مویبندی ایجاد می شود، در صورتی که چنین چیزی برای سنگریزه‌ها اتفاق نمی افتد. قطر متوسط مجموعه سنگریزه ۹ میلی- متر است. زاویه اصطکاک داخلی براساس انجام آزمون زاویه آسایش معادل ۴۱/۳ درجه اندازه گیری شده است. شکل (۵) مجموعه سنگریزه‌ها را نشان می دهد.

روش انجام آزمایش

در آغاز با توجه به قطر مصالح دانه‌ای، ضخامت درونی جعبه را بسته به قطر مصالح تنظیم می کنیم. سپس، با حرکت دادن پیچ‌های متصل به بستر اصلی دستگاه در مسیر دستک‌های شیاردار و محکم کردن آنها، بستر اصلی دستگاه بر روی زاویه مورد نظر نسبت به افق نصب می شود. دو ریل افقی به اندازه قطر متوسط ذرات (d_{50}) از یکدیگر دور می گردند و در فاصله ایجاد شده یک قطعه آکاستیو فشرده مکعب مستطیلی شکل به- عنوان درپوش (door) قرار می گیرد. سپس مصالح دانه- ای وارد جعبه آزمایش می شوند. البته نحوه ریختن مصالح دانه‌ای درون جعبه متفاوت است که در ادامه تشریح می گردند.



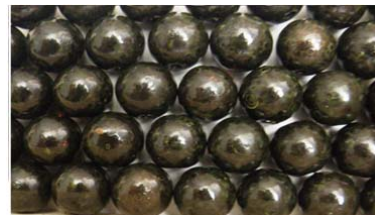
شکل ۵ نمای نزدیک از مجموعه سنگریزه

- ریختن گوی‌های پلاستیکی در جعبه: همان‌طور که در بخش ۱،۴ بیان گردید، دو آرایش شل و متراکم برای

داخلی (ϕ) گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل برابر ۳۰/۷ درجه اندازه‌گیری و تعیین گردیده است.

آرایش متراکم. در آرایش متراکم ابتدا دانه‌ها در اولین ردیف ریخته می شوند و سپس هر دانه دقیقاً بین دو دانه ردیف پایینی قرار می گیرد و این روند تا پر شدن کامل جعبه ادامه می یابد. دستیابی به این آرایش نیز کاری بسیار دشوار است و نیاز به تمرکز و دقت بالایی دارد، به طوری که پر کردن جعبه با آرایش متراکم تقریباً نیازمند مدت زمانی در حدود ۵۰ دقیقه می باشد.

چگالی گوی‌های پلاستیکی در آرایش متراکم برابر ۱/۰۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. با انجام آزمون تعیین زاویه آسایش، زاویه اصطکاک داخلی گوی‌های پلاستیکی در آرایش متراکم برابر ۳۷/۴ درجه اندازه‌گیری شده است. شکل (۴) نحوه چیدمان دو آرایش شل و متراکم را برای گوی‌های پلاستیکی نشان می دهد.



الف) آرایش متراکم



ب) آرایش شل

شکل ۴ انواع آرایش گوی‌های پلاستیکی

مجموعه سنگریزه. مجموعه سنگریزه برای مقایسه شباهت‌ها و تفاوت‌های آن با ماسه درشت‌دانه مورد استفاده در آزمون دریچه [15] انتخاب شده است. در

گوی‌های پلاستیکی در نظر گرفته شده است. قرار دادن دانه‌ها در جعبه مطابق هر یک از این دو آرایش با کیفیتی که ذکر شد، کاری بس دشوار است. پس از بررسی‌های فراوان، تصمیم بر آن شد که شیشه ضد-ضربه توانایی جابه‌جایی به‌صورت کشویی داشته باشد. بدین منظور، شکافی به ضخامت ۱۱ میلی‌متر بر روی وجه درونی شانه‌های قائم جانبی تعبیه شد تا شیشه محافظ به ضخامت ۱۰ میلی‌متر بتواند بدون لق‌زدن به-صورت کشویی درون شکاف وارد و خارج شود. با توجه به توضیحات فوق، برای قرار دادن گوی‌های پلاستیکی درون جعبه ابتدا شیشه محافظ خارج می‌شود و در مرحله بعد، بستر اصلی دستگاه بر روی یک زاویه مایل تنظیم می‌گردد که این امر سبب می‌شود فرآیند چیدن گوی‌ها در جعبه مطابق آرایش شل یا متراکم، برای انجام‌دهنده آزمایش با سهولت بیشتری صورت پذیرد؛ زیرا اگر بستر دستگاه بر روی زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق قرار گیرد، شتاب بیشتری ($g \times \sin 90^\circ$) نسبت به زاویه بستر مایل مانند زاویه ۵۰ درجه ($g \times \sin 50^\circ$) به دانه‌ها اعمال می‌شود، بنابراین احتمال ریزش گوی‌های چیده‌شده در ترازهای مختلف افزایش می‌یابد و در نتیجه زحمت کار بیشتر خواهد بود. از سوی دیگر، باید تا حد امکان از ایجاد ارتعاش به دستگاه جلوگیری نمود و در چیدن گوی‌ها حداکثر توان را به‌کار گرفت. با انجام این عملیات و در نظر گرفتن تمامی تدابیر ذکر شده می‌توان گوی‌ها را با هر یک از آرایش‌های شل یا متراکم تا بالاترین تراز در جعبه قرار داد. سرانجام پس از آن که جعبه کاملاً پر شد، شیشه ضدضربه محافظ در محل اولیه خود یعنی درون شکاف موجود روی شانه‌های جانبی نصب می‌گردد.

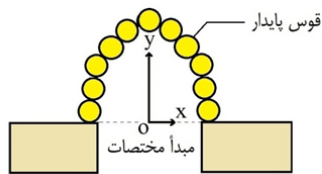
- ریختن سنگریزه‌ها در جعبه: قرار دادن سنگریزه‌ها در جعبه آزمایش با فرآیندی که برای گوی‌های پلاستیکی شرح داده شد، متفاوت است. بدین منظور، ابتدا شیشه محافظ وارد شکاف جعبه می‌شود. در مرحله بعد، مصالح دانه‌ای با همان جرم ثابت ۱۹۰۰ گرم درون

فضای جعبه ریخته می‌شوند.

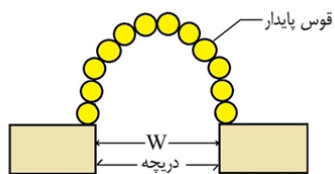
پس از قرار دادن مصالح دانه‌ای درون جعبه آزمایش، سرانجام آکاستیو به طرف پایین منتقل می‌گردد و به‌طور کامل برداشته می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که برای عدم ایجاد تنش‌های برشی در مصالح باید نوع حرکت دریاچه به‌صورت انتقالی رو به پایین باشد. اگر با برداشتن درپوش، بر روی دریاچه یک قوس تشکیل شد، این مرحله به‌عنوان اولین گام آزمایش انتخاب می‌شود، ولی چنان‌چه قوسی ایجاد نشد، عرض دریاچه هر مرتبه به‌اندازه «یک میلی‌متر» افزایش داده می‌شود تا جایی که اولین قوس زدگی در مصالح پدیدار گردد. در این لحظه عرض دریاچه متناظر با نخستین قوس به‌عنوان گام اول آزمایش در نظر گرفته می‌شود و اطلاعات مربوط به ابعاد قوس قرائت می‌گردد. در گام دوم، دریاچه به‌اندازه $[d_{50} + 0.2]$ (cm)، در گام سوم به‌اندازه $[d_{50} + 0.4]$ (cm)، ... و در گام n م به اندازه $[d_{50} + (n-1) \times 0.2]$ (cm) باز می‌شود و در هر گام به‌ازای یک اندازه زاویه بستر و عرض دریاچه معین، مشخصات ظاهری قوس تشکیل شده شامل عرض و ارتفاع قوس قرائت و ثبت می‌شود.

با یک دید دقیق به فرآیند آزمون می‌توان گفت که با برداشت دریاچه، تمامی مصالح از جعبه خارج نمی‌شوند، بلکه پس از گذشت زمان معینی از شروع تخلیه مصالح، ذرات محیطی طوری در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند که یک قوس پایدار در روی دریاچه ایجاد می‌شود. این قوس می‌تواند فشار حاصل از مصالح اطراف خود را تحمل کند و آن را به دو تکیه‌گاه تحتانی خود انتقال دهد. علت وقوع این پدیده در مصالح دانه‌ای این است که حین خارج شدن مصالح از دریاچه در اثر برخورد ذرات با یکدیگر، بین دانه‌ها مقداری اصطکاک ایجاد می‌شود که در نهایت سبب بسیج شدن مقاومت برشی بین ذرات و در نتیجه قفل‌شدگی (Interlocking) ذرات در یکدیگر می‌گردد. همین قفل‌شدگی ناشی از اصطکاک داخلی ذرات مصالح دانه‌ای منجر به تولید

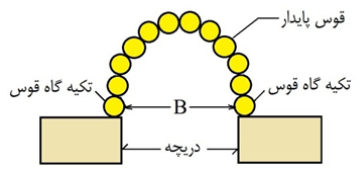
عرض دریاچه. همان‌طور که در بخش ۵ به طور اجمالی بیان گردید، دریاچه عبارت است از فضای خالی بین دو ریل افقی که پیش از انجام آزمون به وسیله یک قطعه پلاستیکی فشرده به نام آکاستیو پر می‌شود و برای اجرای آزمایش این آکاستیو برداشته می‌شود. ضمناً عرض دریاچه با نماد W نمایش داده می‌شود. از طرفی، عرض دریاچه نسبت به مبدأ مختصات تعریف شده در پایین‌ترین تراز جعبه آزمایش، متقارن است و همواره دریاچه در وسط جعبه و به فاصله یکسان از دو بر کناری تا شانه‌ها قرار دارد. شکل (۶-الف) محور و مبدأ مختصات جعبه آزمایش و شکل (۶-ب) دریاچه و اندازه عرض دریاچه را به طور شماتیک نشان می‌دهند.



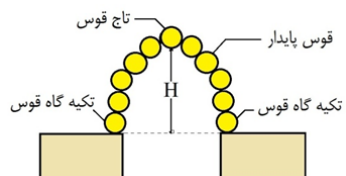
الف) نمایش دستگاه محور مختصات (X و Y) و مبدأ مختصات (O) برای اندازه‌گیری موقیت ذرات مصالح دانه‌ای



ب) نمایش شماتیک دریاچه و اندازه عرض دریاچه



پ) اندازه عرض قوس



ت) اندازه ارتفاع قوس

شکل ۶ مشخصات هندسی قوس

یک زنجیره نیرویی در یک سازه پایدار قوسی شکل در مصالح می‌گردد که اصطلاحاً پدیده قوس زدگی نامیده می‌شود.

به‌ازای هر زاویه بستر، این روند افزایش عرض دریاچه تا آن‌جا ادامه می‌یابد که دیگر هیچ قوسی بر روی دریاچه ایجاد نشود. با توجه به مطالب بیان شده، آخرین گام آزمایش، مربوط به عرضی از دریاچه است که دقیقاً یک مرحله قبل از عرض دریاچه مربوط به عدم تشکیل قوس می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که تا حد امکان، باید انجام آزمایش در شرایط ایده‌آل زیر صورت پذیرد:

- کنترل دقیق آرایش و چگالی مجموعه مصالح دانه‌ای

- کنترل صحت زاویه قرارگیری بستر اصلی نگهداری مصالح دانه‌ای.

- قرارگیری بستر تکیه‌گاهی دستگاه به‌صورت کاملاً افقی و بدون کوچک‌ترین انحراف از تراز.

- ساکن بودن کامل جعبه در حین انجام آزمایش

- پرهیز از اعمال هرگونه ارتعاش ناشی از ضربه.

- باز شدن متقارن دو ریل افقی: (برای اطمینان از

حصول این شرط، باید همواره طول دو ریل افقی

طرفین دریاچه کاملاً با هم برابر باشد که مدرج بودن

دو قطعه در این خصوص کمک می‌کند).

داده‌های حاصل از آزمایش

در مجموع، ۷۳۴ گام آزمایش بر روی مصالح دانه‌ای انجام شده است که ۲۷۶ آزمایش مربوط به گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل (برای ده زاویه قرارگیری بستر)، ۳۱۶ گام آزمون مربوط به گوی‌های پلاستیکی در آرایش متراکم (برای ده زاویه بستر) و ۱۴۲ گام آزمایش مربوط به مجموعه سنگریزه‌ها (برای چهار زاویه بستر) می‌باشد. در ابتدا چند تعریف در رابطه با اطلاعات وابسته به دریاچه و قوس پایدار ارائه می‌شود.

به طور مثال، کد L-40-6.2-6.0-4.8 اطلاعات قرائت شده مربوط به قوس تشکیل شده در گوی های پلاستیکی با آرایش شل، بر روی زاویه بستر به اندازه ۴۰ درجه با عرض دریچه معادل ۶/۲ سانتیمتر است که عرض و ارتفاع قوس به ترتیب ۶ و ۴/۸ سانتی متر می باشد.

نتایج حاصل از مشاهدات

بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده، می توان نتایج متعددی را به صورت زیر استخراج و دلیل وقوع آنها را تفسیر نمود.

حد شروع قوس زدگی. در گام های ابتدایی آزمایش، باز شدن تدریجی دریچه و افزایش عرض آن، سبب خروج مقدار اندکی از ذرات مصالح دانه ای می شود، اما ممکن است هیچ گونه ساختار پایداری به شکل یک قوس بر روی دریچه ایجاد نگردد. این در حالی است که با رسیدن عرض دریچه به یک حد معین، ذرات بیشتری شروع به فرو ریختن از منفذ دریچه می نمایند و به این ترتیب نخستین قوس پایدار بر روی دریچه تشکیل می شود. به منظور یافتن حداقل عرض دریچه که سبب فعال شدن اثر قوس زدگی در مصالح دانه ای و ایجاد اولین قوس پایدار بر روی دریچه می شود، با توجه به اطلاعات قرائت شده از هر گام آرایش می توان نسبت کوچک ترین عرض دریچه به قطر متوسط ذرات هر نوع از مصالح دانه ای را به ازای مقادیر متفاوت زاویه بستر اصلی دستگاه به صورت زیر محاسبه نمود:

- گوی های پلاستیکی در هر دو آرایش شل و متراکم:

$$\frac{W_{\min}}{d_{50}} = \frac{1.6 \text{ (cm)}}{1.2 \text{ (cm)}} = 1.33$$

- مجموعه سنگریزه:

$$\frac{W_{\min}}{d_{50}} = \frac{1.2 \text{ (cm)}}{0.9 \text{ (cm)}} = 1.33$$

با توجه به نتایج فوق، نسبت کوچک ترین عرض دریچه به قطر متوسط ذرات هر نوع از مصالح دانه ای برابر ۱/۳۳ است. این نسبت مستقل از زاویه بستر اصلی

عرض قوس. قوس تشکیل شده بر روی دریچه، مجموعه ای از ذرات است که شکل ظاهری آن دارای یک تاج و دو پایه یا تکیه گاه می باشد. در واقع هر یک از این دو پایه، یک دانه از قوس می باشد که یکی بر روی قطعه افقی سمت راست و دیگری بر روی قطعه سمت چپ مجاور دریچه باز شده قرار گرفته است. مطابق شکل (۶-ب)، فاصله افقی بر تا بر این دو دانه، به عنوان عرض قوس در نظر گرفته می شود که با نماد B نشان داده می شود.

ارتفاع قوس. مطابق شکل (۶-ت)، قوس تشکیل شده بر روی دریچه، مجموعه ای از ذرات است که شکل ظاهری آن دارای یک تاج و دو پایه یا تکیه گاه می باشد. در واقع منظور از محل تاج قوس، مکان هندسی بالاترین ذره شرکت کننده در قوس می باشد. بر اساس تعریف، فاصله قائم از بر ذره واقع در تاج قوس تا مبدأ مختصات که دقیقاً در پایین ترین تراز جعبه و در وسط دریچه قرار گرفته است، ارتفاع قوس نامیده می شود و با نماد H نمایش داده می شود.

در هر گام از آزمایش، اطلاعات قرائت شده از روی قوس پایدار به صورت یک کد پنج کاراکتری ثبت می شوند. فرم کلی این کد به شکل A-θ-W-B-H است که به ترتیب از سمت چپ به شرح زیر قابل بیان هستند.

A بیانگر نوع مصالح دانه ای است که برای گوی های پلاستیکی با آرایش شل، گوی های پلاستیکی با آرایش متراکم و مجموعه سنگریزه ها به ترتیب به صورت D, L, R و می باشد.

θ نماینده زاویه قرارگیری بستر مصالح دانه ای نسبت به افق بر حسب درجه است.

W نشان دهنده مقدار باز شدگی عرض دریچه بر حسب سانتی متر است.

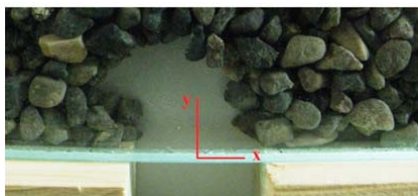
B نماینده عرض قوس پایدار بر حسب سانتی متر است.

H نمایانگر ارتفاع قوس پایدار بر حسب سانتی متر است.

الف) گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل

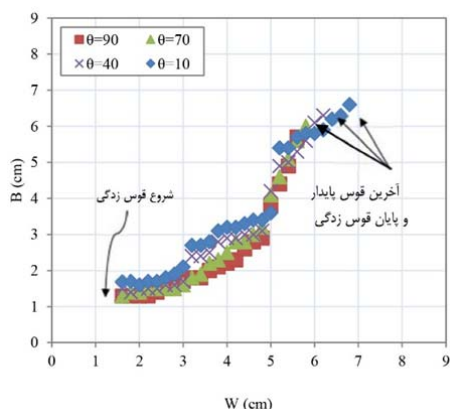


ب) گوی‌های پلاستیکی در آرایش متراکم

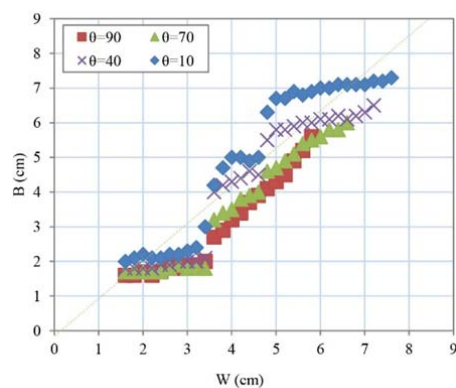


ب) مجموعه سنگریزه

شکل ۷ تصویری از یک نمونه قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای و تشکیل قوس پایدار بر روی دریچه



الف) گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل



ب) گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم

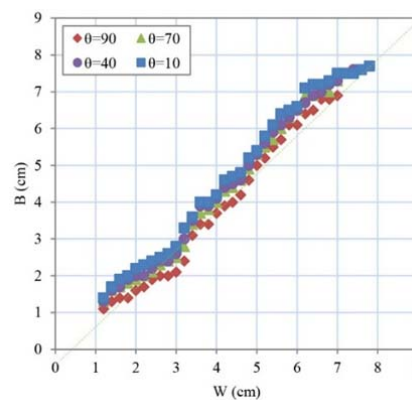
دستگاه و نوع آرایش مصالح دانه‌ای است و فقط وابسته به قطر متوسط ذرات تشکیل دهنده مصالح دانه‌ای می‌باشد. بنابراین اگر نسبت کوچکترین عرض دریچه به قطر متوسط مصالح دانه‌ای به‌عنوان «حد شروع قوس‌زدگی» نام‌گذاری شود، می‌توان گفت که این پارامتر همواره ثابت و برابر $1/33$ است. مفهوم حد شروع قوس‌زدگی این است که به‌ازای عرض‌های کوچک‌تر از آن، هیچ قوسی در مصالح ایجاد نمی‌شود و عملکرد قوس‌زدگی پدیدار نمی‌گردد. البته برای حصول اطمینان از درستی این یافته، چندین بار مراحل ابتدایی آزمون با عرض‌های بسیار کوچک دریچه برای کلیه مصالح انجام شده است، اما همگی مشاهدات بیانگر صحت این موضوع هستند.

ارتباط اندازه عرض قوس با عرض دریچه. شکل

(۷) نمونه‌ای از تشکیل قوس پایدار بر روی دریچه و شکل (۸) رابطه بین اندازه عرض قوس و عرض دریچه را برای مصالح دانه‌ای مورد استفاده در این آزمایش و به‌ازای مقادیر مختلف زاویه بستر دستگاه نشان می‌دهد. باید توجه داشت که قوس ایجاد شده دقیقاً بر روی دریچه ایجاد نمی‌شود و عرض قوس همواره برابر عرض دریچه نیست. مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که با افزایش عرض دریچه، به‌مقدار عرض قوس افزوده می‌گردد. دلیل این پدیده بدین صورت قابل بیان است که با هر بار باز شدن دریچه، به مصالح بیشتری نسبت به گام قبل اجازه خروج از محل دریچه داده می‌شود و از طرفی قوس برای تشکیل شدن باید حتماً دو تکیه‌گاه خود را به‌نحوی به دو طرف دریچه اتصال دهد، بنابراین قوس ایجادشده مجبور است برای شکل‌گیری به تبع دریچه، عرض خود را افزایش دهد.

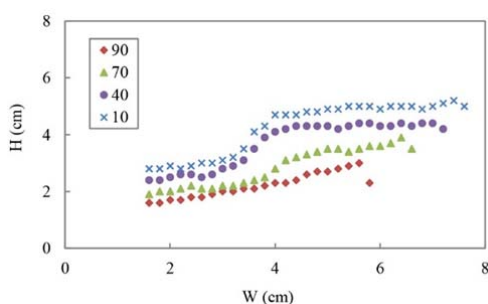


سبب تشکیل قوس پایدار در فاصله بیشتری از تراز دریچه می‌گردد و در نتیجه مختصات محل قرارگیری تاج و در حقیقت ارتفاع قوس افزایش می‌یابد. البته بسته به نحوه قفل‌شدگی دانه‌ها در یکدیگر در حین فرایند تخلیه از دریچه، نرخ افزایش ارتفاع قوس در مقابل افزایش عرض دریچه متفاوت است. برای کلیه مصالح دانه‌ای آزمایش شده در این پژوهش، مشاهدات صورت گرفته نشان می‌دهند که ارتفاع قوس با عرض دریچه رابطه‌ای مستقیم دارد و روند تغییرات آن برای تمامی این مصالح مشابه یکدیگر است.

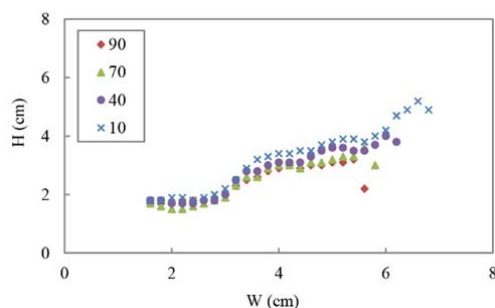


شکل (۸) تغییرات عرض قوس در مقابل عرض دریچه

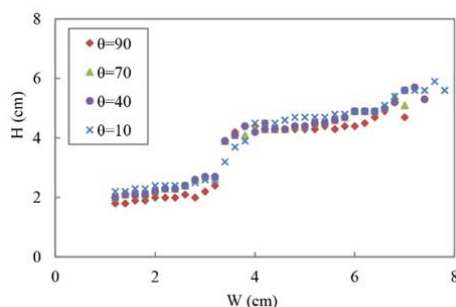
(ب) مجموعه سنگریزه



شکل (۹) تغییرات ارتفاع قوس در مقابل عرض دریچه



شکل (۹) تغییرات ارتفاع قوس در مقابل عرض دریچه



شکل (۹) تغییرات ارتفاع قوس در مقابل عرض دریچه

شکل ۹ تغییرات ارتفاع قوس در مقابل عرض دریچه

ارتباط اندازه ارتفاع قوس با عرض دریچه.

مشاهدات حاکی از آن هستند که محل تاج قوس معمولاً بر روی محور قائم مختصات قرار می‌گیرد. البته باید توجه داشت که برخی از موارد در رابطه با مجموعه سنگریزه‌ها، مکان تاج قوس نسبت به راستای محور قائم مختصات، کمی به طرف راست یا چپ منحرف می‌شود که دلیل آن را می‌توان عدم یکنواختی و تقارن توزیع این مصالح نسبت به محور مختصات جعبه دانست. بدیهی است این عدم تقارن سبب می‌شود که مصالح دانه‌ای از یک طرف (به‌طور مثال از سمت چپ دریچه) با دبی بیشتری نسبت به طرف دیگر تخلیه گردد. به همین دلیل تشکیل قوس پایدار به یک سمت متمایل خواهد شد و در نتیجه تاج قوس هم به همان سمت جهت‌گیری می‌کند.

شکل (۹) تغییرات ارتفاع قوس برحسب عرض دریچه را نمایش می‌دهد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که با افزایش عرض دریچه به ارتفاع قوس افزوده می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان به تخلیه بیشتر مصالح دانه‌ای از خروجی، با افزایش عرض دریچه نسبت داد. هر چه عرض دریچه زیادتر شود، به مصالح دانه‌ای بیشتری اجازه خروج از دریچه داده می‌شود، بنابراین پایه‌هایی در فاصله بیشتری از هم قرار می‌گیرند و اثر قفل‌شدگی دانه‌ها در یکدیگر و بسیج‌شدگی تنش‌های برشی بین ذرات واقع در ترازهای بالای دریچه

متر کوچک‌تر از گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم و شل با قطر متوسط ۱۲ میلی‌متر است. از طرفی با وجود تساوی قطر متوسط گوی‌های پلاستیکی، مقدار افت ارتفاع آخرین قوس در آرایش متراکم ($\phi = 37.4^\circ$) نسبت به آرایش شل ($\phi = 30.7^\circ$) اندکی کمتر است.

شکل هندسی منطقه قوس‌زدگی. شکل (۱۰) مکان هندسی ذرات تشکیل‌دهنده قوس را به‌ازای عرض دریچه به اندازه $2/8$ و $5/6$ سانتی‌متر و زاویه بستر 40° و 90° درجه نشان می‌دهد. در شکل (۱۰) منظور از W و θ به‌ترتیب عرض دریچه و زاویه بستر مصالح نسبت به افق و x و y نمایانگر مکان هندسی نقاط واقع در قوس نسبت به مبدأ مختصات می‌باشد. بررسی دقیق شکل ۱۰

می‌تواند به‌منظور مقایسه اثر هم‌زمان عرض دریچه و زاویه بستر مصالح بر روی شکل هندسی و ابعاد قوس تشکیل‌شده به‌کار رود. با دقت در هندسه قوس‌های تشکیل‌شده می‌توان با تخمین بسیار خوبی گفت که شکل هر قوس از یک سهمی به معادله زیر تبعیت می‌کند:

$$y = H \cdot \left[1 - \left(\frac{2x}{B} \right)^2 \right] \quad (1)$$

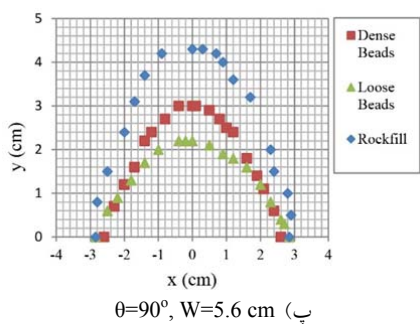
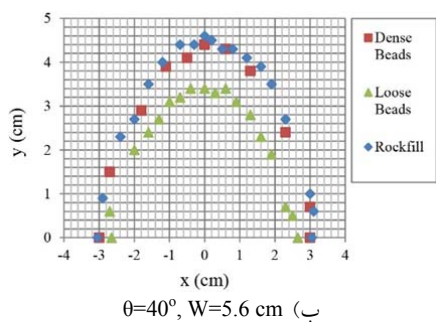
در این رابطه

B عرض قوس، H ارتفاع قوس، X و y طول و عرض مکان هندسی نقاط تشکیل‌دهنده قوس نسبت به مبدأ مختصات می‌باشند.

به بیان دیگر، شکل هندسی منطقه تحت تأثیر عملکرد قوس‌زدگی به‌صورت یک سهمی است. دانستن شکل ناحیه قوس‌زدگی نقش بسزایی در به‌کارگیری نوع فرضیات و انتخاب روش‌های مورد نیاز به‌منظور بررسی و تحلیل تنش - کرنش و روابط حاکم بر زنجیره نیرویی موجود در قوس برای شناخت سازوکار انتقال بار ناشی از پدیده قوس‌زدگی ایفا می‌کند. براساس این یافته می‌توان گفت که اگر یک بازشو با

مطابق شکل (۹)، افزایش در زاویه قرارگیری بستر مصالح نسبت به افق سبب کاهش ارتفاع قوس شده است. با افزایش زاویه بستر مصالح نسبت به افق، مؤلفه شتاب ثقل مؤثر ($g \times \sin \theta$) اعمال‌شده بر مصالح افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار فشار سربار ($\gamma \times z$) موجود بر روی قوس ایجادشده بیشتر ($(\rho g \times \sin \theta) \times z$) می‌شود. بنابراین، به قوس تشکیل‌شده فشار بیشتری اعمال می‌شود و از این‌رو، ابعاد آن کوچک‌تر خواهد گردید. به عبارت دیگر، برای دو زاویه مختلف، همواره قوسی با ابعاد بزرگ‌تر بر روی زاویه کوچک‌تر تشکیل می‌شود. همان‌طور که بیان گردید، با افزایش اندازه دریچه، ارتفاع قوس پایدار تشکیل‌شده افزایش می‌یابد، اما نکته قابل توجه آن است که این روند افزایشی تا انتهای آزمون یعنی انهدام قوس انجام نمی‌شود و آخرین قوس پایدار تشکیل‌شده بر روی دریچه دارای بیشینه اندازه ارتفاع نمی‌باشد، بلکه دقیقاً در آستانه انهدام، یعنی یک گام پیش از فروپاشی قوس، ارتفاع قوس نسبت به گام قبل اندکی کاهش می‌یابد (شکل ۹). علت این مسأله را می‌توان این‌گونه بیان نمود که باتوجه به افزایش عرض دریچه و در نتیجه آن افزایش عرض قوس، از یک‌سو مصالح بیشتری میل به خروج از دریچه را پیدا می‌کنند، و از سوی دیگر قابلیت تحمل فشار قوس دقیقاً در لحظه قبل از انهدام کامل، تقلیل می‌یابد و بنابراین تغییر مکان قائم (رو به پایین) تاج افزایش می‌یابد. از این‌رو، قوس مجبور است برای تحمل فشار وارد شده ارتفاع خود را کم کند (شکل ۹).

این پدیده یافته‌ای جدید است که از نتایج این پژوهش به‌دست آمده است. مقایسه نتایج ارائه‌شده در شکل (۹) نشان می‌دهد که به‌ازای تمامی مقادیر زاویه بستر، مقدار افت در ارتفاع آخرین قوس پایدار با قطر متوسط دانه‌ها رابطه مستقیم و با زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای رابطه عکس دارد. یعنی افت ارتفاع در آخرین قوس، برای سنگریزه‌ها با قطر متوسط ۹ میلی-

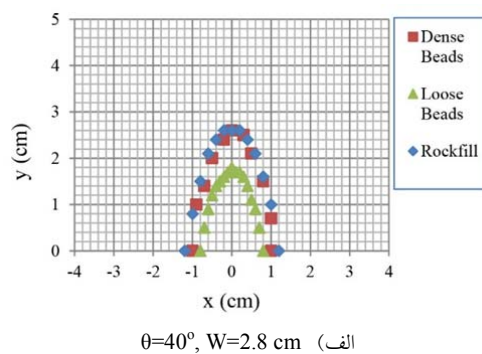


شکل ۱۰ مقایسه شکل قوس تشکیل شده بر روی دو عرض دریاچه و دو زاویه بستر معین

نتیجه گیری

بررسی ماهیت قوس زدگی به معنای تشکیل یک قوس پایدار در مصالح دانه‌ای موضوعی قابل توجه است. یافتن عوامل مؤثر در نحوه شکل‌گیری و مشخصات فیزیکی این قوس شامل عرض و ارتفاع آن می‌تواند به درک جامع‌تر ساز و کار قوس زدگی در مصالح دانه‌ای فاقد چسبندگی کمک کند. به همین منظور یک دستگاه توسعه یافته دریاچه با قابلیت دریاچه و بستر متحرک ساخته شد و به کمک آن ابعاد قوس ایجاد شده در مصالح دانه‌ای برحسب زاویه اصطکاک داخلی، قطر متوسط و زاویه قرارگیری بستر مصالح مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهدات آزمایشگاهی نشان دادند که برای همه مصالح دانه‌ای مورد آزمایش با افزایش عرض دریاچه و کاهش زاویه بستر اصلی دستگاه، عرض و ارتفاع قوس تشکیل شده افزایش می‌یابد. از طرفی، شکل تمامی قوس‌ها که در واقع نمایانگر شکل هندسی

شکل هندسی یک سهمی در مصالح دانه‌ای نظیر یک تونل یا حفره در خاک ماسه‌ای حفر شود، به شرط آن که عرض و ارتفاع آن در رابطه (۱) صدق کند، به سبب پدیده قوس زدگی این تونل یا حفره می‌تواند بدون حایل‌بندی کاملاً پایدار باقی بماند. البته توجه به این نکته ضروری است که این ادعا فقط برای مدل‌سازی تونل در شرایط محیط این آزمایش (یعنی ابعاد دستگاه توسعه یافته دریاچه، مقدار مجاز مصالح دانه‌ای بر روی قوس ایجاد شده و برقراری شرایط کرنش مستوی) اعتبار دارد. از سوی دیگر، شکل (۱۰) اثر اندازه عرض دریاچه و زاویه بستر مصالح دانه‌ای نسبت به افق را هم بر روی عرض و ارتفاع قوس تشکیل شده نشان می‌دهد. مطابق مشاهدات انجام شده با افزایش اندازه عرض دریاچه، عرض قوس ایجاد شده نیز بیشتر خواهد شد. دلیل این امر آن است که با افزایش عرض دریاچه مصالح بیشتری تخلیه می‌گردند و از آنجا که قوس روی دریاچه تشکیل می‌شود، الزاماً عرض آن باید افزایش یابد. همچنین بزرگ‌ترین قوس در سنگریزه‌ها ($\phi=41.3^\circ$) و کوچک‌ترین قوس در گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل ($\phi=30.7^\circ$) ایجاد شده است. این در حالی است که قطر گوی‌های پلاستیکی در هر دو آرایش یکسان ($d=12\text{mm}$) و بزرگ‌تر از اندازه قطر متوسط سنگریزه‌ها ($d_{50}=9\text{mm}$) است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ابعاد قوس تشکیل شده دارای رابطه‌ای مستقیم با تراکم و زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای است.



صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. هم‌چنین، از جناب آقای دکتر محمد غفوری که در رفع اشکالات موجود و نحوه تفسیر نتایج آزمایشگاهی سهم بسزایی داشته‌اند، به‌طور ویژه تشکر و قدردانی می‌گردد.

ناحیه تحت اثر قوس زدگی است با تقریب بسیار خوبی از رابطه یک سهمی تبعیت می‌کند. علاوه بر این، به‌ازای یک اندازه عرض دریاچه و زاویه بستر ثابت، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چگالی مصالح دانه‌ای، ارتفاع و عرض قوس افزایش می‌یابد.

قدردانی

از مشاوره ارزنده جناب آقای دکتر جعفر بلوری بزاز در خصوص طراحی جزئیات دستگاه توسعه‌یافته دریاچه

مراجع

1. Terzaghi, K., "Theoretical Soil Mechanics." J. Wiley and Sons, Inc. 510, (1943): pp. 510
2. Jiang, Y.-J., Towhata, " Experimental Study of Dry Granular Flow and Impact Behavior Against a Rigid Retaining Wall", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, pp. 1-17, (2012).
3. Akbarzadeh, H., A. Bayat, "Investigating ASTM F 1962 Arching Factor for Polyethylene Pipes Installed by Horizontal Directional Drilling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, (2012).
4. Chen, C.N., W.-Y. Huang, and C.-T. Tseng, " Stress Redistribution and Ground Arch Development during Tunneling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, NO 26(1), pp. 228-235, (2011).
5. Chen, R.P., et al., " Face stability analysis of shallow shield tunnels in dry sandy ground using the discrete element method", *Computers and Geotechnics*, NO 38(2), pp. 187-195, (2011)
6. Chen, R.p., et al., "Experimental Study on Face Instability of Shield Tunnel in Sand", *Tunnelling and Underground Space Technology*, No 33(0), PP. 12-21, (2013).
7. Lee, C.J., et al., "Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil", *Tunnelling and Underground Space Technology*, No 21(2), pp. 119-132, (2006).
8. Kahyaoglu, M., et al., "Numerical Analyses of Piles Subjected to Lateral Soil Movement", *KSCE Journal of Civil Engineering*, No 16(4), pp. 562-570, (2012).
9. Eekelen, S.J.M., et al., "Model Experiments on Piled Embankments". *Part II. Geotextiles and Geomembranes*, No 32(0), pp. 82-94, (2012).
10. Karinski, Y.S., A.N. Dancygier. and I. Leviathan, "An Analytical Model to Evaluate the Static Soil Pressure on a Puried Structure". *Engineering Structures*, No 25(1), pp. 91-101, (2003).
11. Huang, Z., E. Broch. and M. Lu, "Cavern roof stability—mechanism of arching and stabilization by rockbolting". *Tunnelling and Underground Space Technology*, No.17(3), pp. 249-261, (2002).

12. Sargand, S., T. Masada, "Soil Arching over Deeply Buried Thermoplastic Pipe", Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, No 1849(-1), pp. 109-123, (2003).
13. Roberts, A.W., "Review of Mass-flow Hopper Design with Respect to Stress Fields and Surcharge Loads". *Particuology*, No 8(6), pp. 591-594, (2010).
14. Tien , H.-J., "A Literature Study of the Arching Effect", Massachusetts Institute Of Technology. pp. 196, (1996).
15. Guo., Zhou, "Arch in Granular Materials as a Free Surface Problem". *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*, (2012).
16. Terzaghi, K., "Stress Distribution in Dry and in Saturated Sand Above a Yielding Trap-Door. in First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", Cambridge, Massachusetts,(1936).
17. ASTM Standard C1444-00," Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders ASTM International", West Conshohocken, PA, (2005).