

## مطالعه ویژگی‌های قوس بحرانی در مصالح دانه‌ای با استفاده از دستگاه توسعه یافته دریچه\*

علی احمدی<sup>(۱)</sup>

سید احسان سیدی حسینی‌نیا<sup>(۲)</sup>

**چکیده** هدف این مقاله، بررسی آزمایشگاهی رخدادهای مرتبط با پدیده قوس زدگی در مصالح دانه‌ای با استفاده از دستگاه توسعه یافته دریچه می‌باشد. بدین منظور، با تمرکز بر روی ویژگی‌های قوس پایدار در آستانه انهدام و زمان پس از انهدام قوس زدگی، می‌توان به نتایج نوینی دست یافت. قوس بحرانی برای یک محیط دانه‌ای، آخرین قوس پایدار متناظر با دریچه‌ای است که عرض آن به‌ازای یک زاویه بستر معین، دارای حداکثر مقدار ممکن است. حداکثر عرض دریچه برحسب زاویه اصطکاک داخلی و زاویه بستر مصالح دانه‌ای، حدوداً ۴/۷ تا ۸/۷ برابر قطر متوسط ذرات مشاهده شده است. اگرچه عرض قوس بحرانی دارای مقدار بیشینه ممکن است، اما ارتفاع قوس بحرانی نسبت به گام پیشین آزمون، نه تنها افزایش نمی‌یابد، بلکه از مقدار آن کاسته شده است. ضمناً، پس از انهدام قوس، مصالح دانه‌ای باقی مانده درون جعبه تقریباً به صورت متقارن در روی دو ریل افقی طرفین دریچه قرار می‌گیرند و آرایش هر یک، با تقریب بسیار خوبی نسبت به آرایش اولیه پیش از انجام آزمایش، ثابت و بدون تغییر باقی می‌مانند.

**واژه‌های کلیدی** مصالح دانه‌ای، دریچه، قوس، بحرانی، انهدام.

## Study on the Features of Critical Arch in Granular Materials by the Developed Trapdoor Apparatus

A. Ahmadi

E. Seyedi Hosseininia

**Abstract** This paper experimentally discusses events being relevant to the arching effect in granular materials by the developed trapdoor apparatus. A focus on the features of stable arch at two moments when an arch is on the verge of collapse in addition to the time after the collapse. The critical arch for a granular medium is the last stable arch belonging to a trapdoor with maximum possible width at a particular base angle. The maximum trapdoor width is observed 4.7 to 8.67 times the average particles diameter depending on the internal friction angle and base angle values. The critical arch has the maximum width in proportion to previous run, whereas its height not only increases but will get smaller. After arch collapses, particles remained in the test box, are approximately located on the horizontal rails symmetrical. Besides, their arrangement remains almost constant compared to early one.

**Key Words** Granular Materials, Trapdoor, Arch, Critical, Collapse.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۸/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۹/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته مکانیک خاک و پی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

### مقدمه

محیط دانه‌ای را می‌توان مجموعه‌ای از ذرات مجزا دانست که در تماس با یکدیگر قرار دارند. مقاومت برشی مصالح دانه‌ای که مطابق معیار کولمب، عامل چسبندگی در آنها صفر است، متأثر از پارامتر زاویه اصطکاک داخلی ذرات تشکیل دهنده محیط می‌باشد. در شرایطی که در یک محیط دانه‌ای با حذف پی‌درپی ذرات، ساختاری پایدار ایجاد شود، اندرکنش متقابل ذرات با یکدیگر، آنها را از فروپاشی در برابر تنش‌های وارد از مصالح مجاور حفظ می‌کند [1]. از آنجایی که در اکثر موارد مشاهده شده، شکل این ساختار شبیه به یک قوس یا کمان است، پژوهشگران نام قوس زدگی را برای این پدیده برگزیده‌اند. قوس زدگی در یک محیط دانه‌ای همگن تحت بارگذاری همسان با بسیج شدن مقاومت برشی ایجاد می‌شود [2] و سبب شکل‌گیری قوسی پایدار می‌گردد که فشار وارد بر محیط دانه‌ای را از نواحی نرم‌تر به مناطق سخت‌تر سازه منتقل می‌کند [3]. به عبارت دیگر، اگر اجزای محیط که در آستانه از دست دادن تعادل استاتیکی خود هستند، از نواحی متعادل پیرامون برای بقای ایستایی خود به‌عنوان یک تکیه‌گاه استفاده کنند، در آنها میل به پایداری ایجاد می‌شود و در این شرایط قوس زدگی رخ می‌دهد [4]. نخستین بار گو و ژو [3] به بررسی پدیده قوس زدگی به‌عنوان یک قوس پایدار در مصالح دانه‌ای به‌شکل یک مس‌ثله سطح آزاد پرداخته‌اند. اخیراً نیز مطالعه آزمایشگاهی احمدی و سیدی حسینی‌نیا [5] با ساخت دستگاه توسعه یافته درجه، قوس زدگی را در نمونه‌هایی از مصالح دانه‌ای در حالت کرنش مستوی مورد پژوهش قرار داده است. در مقاله مذکور روابطی میان ابعاد قوس پایدار و عرض درجه به‌زای شتاب‌های ثقل مختلف و پارامترهای مصالح دانه‌ای ارائه گردیده است.

قوس زدگی یکی از جامع‌ترین پدیده‌های طبیعی است که تحت شرایطی در هر دو محیط میدانی و آزمایشگاهی برای مصالح از جمله خاک اتفاق می‌افتد.

با این وجود، ماهیت پدیده قوس زدگی تاکنون به‌معنای انتقال بار و ایجاد تغییرات فشار در محیط‌های مرتبط با سازه‌های مهندسی ژئوتکنیک مورد مطالعه قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به موضوع انتقال فشار در خاک در تماس با دیوار نگهدارنده [6]، دیواره‌های ساحلی [7]، تغییرات ظرفیت باربری شالوده‌های چندگانه در خاک ماسه‌ای [8]، بررسی بازتوزیع تنش‌ها در محدوده حفاری شده تونل به‌کمک روش‌های عددی [9] و آزمایشگاهی [10]، مطالعه موردی بر روی قوس زدگی در خاک بالای تونل حفر شده در خاک ماسه‌سنگ [11]، بررسی اثر قوس زدگی بر روی ظرفیت باربری پی‌های مرکب مسلح شده با لایه‌های ژئوسینتتیک در دو جهت افقی و قائم [12]، قوس زدگی در شیب‌های خاک مسلح شده با شمع [13] و خاکریزهای مسلح شده با ستون‌های سنگی [14] اشاره نمود. به‌منظور پرهیز از طولانی شدن ذکر پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته، توصیه می‌شود برای آشنایی بیشتر با پدیده قوس زدگی در مصالح دانه‌ای، مراجع [15,16] مطالعه گردند.

نتایج نشان داده شده در اثر قبلی نویسندگان [5]، حاصل از بررسی اثر قوس زدگی در محیط دانه‌ای قبل از انهدام قوس پایدار بر روی درجه بوده است. هدف این نوشتار، تمرکز بر روی دو رخداد قابل تأمل در آزمون توسعه یافته درجه است که یکی مربوط به آستانه انهدام قوس پایدار است و دیگری پس از فروپاشی قوس، در ساختار مصالح دانه‌ای ملاحظه گردیده است. با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به‌کمک دستگاه توسعه یافته درجه [5] و بررسی دقیق نتایج، می‌توان به پاسخ مناسبی در جهت توجیه تأثیرات پدیده قوس زدگی در مصالح دانه‌ای دست یافت. نتایج به‌دست آمده می‌توانند در تحلیل رفتار ذرات یک محیط دانه‌ای حین خروج از سیلوها و قیف‌های نگهداری، تغییرات تنش در مصالح و همچنین ابعاد ایمن یک بازشوی پایدار استاتیکی در محیط غیرچسبنده بدون نیاز به مهار کاربرد داشته باشند.

بسیج‌شدگی مقاومت برشی در حالت بحرانی (Critical State) واقع می‌شود و براساس معیار کولمب، زاویه اصطکاک داخلی آنها برابر  $\phi_{CS}$  است که این مقدار معادل زاویه ریپوز آن مصالح می‌باشد. برای محاسبه زاویه ریپوز نیز چند روش وجود دارد که در این پژوهش از روشی مشابه روش کیف در استاندارد ASTM C 1444-00 استفاده شده است. نظیر این کار در محاسبه زاویه اصطکاک داخلی در مطالعه گو و ژو [3] نیز انجام شده است.



الف) مجموعه سنگریزه



ب) گوی‌های پلاستیکی

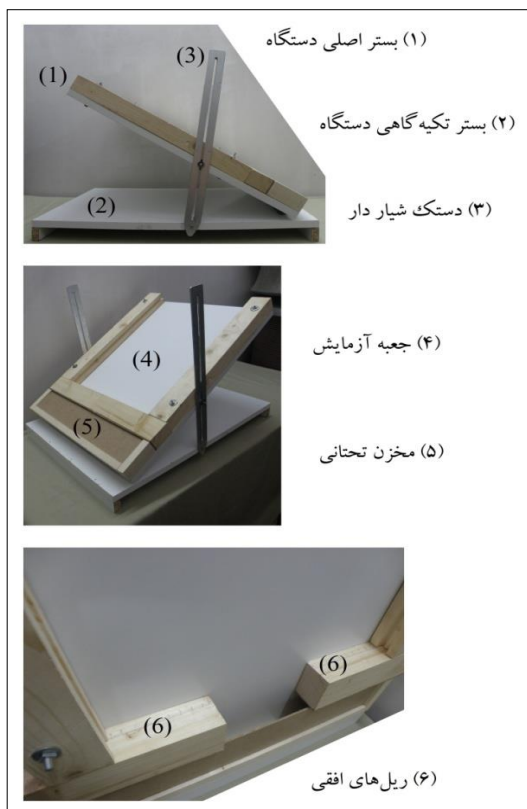
شکل ۱ مصالح دانه‌ای مصرفی

توجه شود که الزامی در استفاده از گوی‌های شیشه‌ای در مدل‌سازی وجود نداشته است. هدف مقاله حاضر در استفاده از گوی‌های پلاستیکی فقط ساختن یک محیط دانه‌ای با ذرات یک‌اندازه بوده و جنس یا زبری سطح دانه‌ها در تشکیل قوس در نظر گرفته نشده است. از طرفی هدف دیگر، مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش بر روی گوی‌های پلاستیکی با گوی‌های شیشه‌ای و سایر مصالح دانه‌ای بوده است. مشابه این کار در مطالعه گو و ژو [3] نیز انجام شده است و با

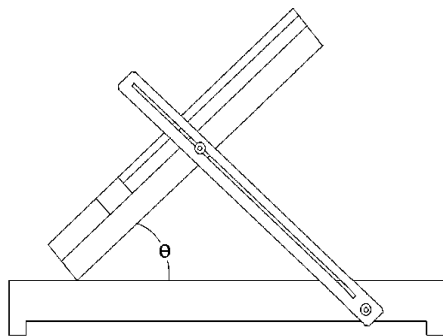
## محیط دانه‌ای آزمایش

مصالح دانه‌ای مصرفی در پژوهش کنونی، همان موارد استفاده شده در مرجع [5] شامل مجموعه سنگریزه (Rockfills) و گوی‌های پلاستیکی (Beads) با دو آرایش (Array) شل (Loose) و متراکم (Dense) هستند. مجموعه سنگریزه (شکل ۱-الف) ترکیبی از مصالح خشک درشت‌دانه و غیرچسبده است که قطر متوسط ذرات ( $d_{50}$ ) آن برابر ۰/۹ سانتی‌متر، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) معادل ۴۱/۳ درجه و چگالی ( $\rho$ ) آن ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شده است. از سوی دیگر، گوی‌های پلاستیکی (شکل ۱-ب) مجموعه‌ای از دانه‌های هم‌اندازه با شکل هندسی کره و فاقد عامل چسبندگی هستند. درحقیقت این نوع مصالح، نمونه‌ای از یک محیط دانه‌ای همگن را شبیه‌سازی می‌کنند. قطر هر دانه از گوی‌های پلاستیکی دقیقا ۱/۲ سانتی‌متر است و از آنجا که کلیه دانه‌ها یک‌اندازه هستند، قطر میانگین مجموعه با قطر هر دانه یکسان و برابر ۱/۲ سانتی‌متر است. با ایجاد دو چیدمان منظم در قرارگیری گوی‌ها می‌توان به دو الگوی تراکم دست یافت که از نظر درجه تراکم، زاویه اصطکاک داخلی و چگالی با یکدیگر متفاوت هستند. آرایش شل (شکل ۲-الف) و آرایش متراکم (شکل ۲-ب) نام‌هایی هستند که برای هر الگو انتخاب شده‌اند [5] و در هر گام از انجام آزمون قابل تولید می‌باشند. این ویژگی سبب می‌شود که در هر گام آزمایش، آرایش شل یا آرایش متراکم گوی‌ها با گام دیگر کاملاً یکسان باشد و مقایسه نتایج به دست آمده امکان‌پذیر گردد. چگالی گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل، ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و زاویه اصطکاک داخلی آنها ۳۰/۷ درجه اندازه‌گیری شده است. گوی‌های پلاستیکی در آرایش متراکم دارای چگالی به مقدار ۱/۰۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و زاویه اصطکاک داخلی ۳۷/۴ درجه هستند. زاویه اصطکاک مصالح با اندازه‌گیری زاویه ریپوز (Angle of Repose) هر یک از آنها انجام شده است. از آنجایی که برای مصالح دانه‌ای که در معرض جریان دانه‌ای (Granular Flow) قرار می‌گیرند، زاویه اصطکاک داخلی آنها در

ضخامت درونی جعبه آزمایش طوری تنظیم می‌شود که مصالح فقط در یک لایه درون جعبه قرار گیرند. از طرفی، مطابق شکل (۴)، بستر اصلی دستگاه به‌عنوان یک سطح شیب‌دار نسبت به راستای افق زاویه‌ای به اندازه  $\theta$  می‌سازد. به‌منظور اعمال مقادیر متفاوت شتاب ثقل مؤثر به ذرات، این بستر می‌تواند مطابق شکل (۵)، بر روی مقادیر صفر تا ۹۰ درجه نسبت به افق ثابت شود.



شکل ۳ بخش‌های اصلی دستگاه توسعه‌یافته دریاچه



شکل ۴ زاویه بستر اصلی دستگاه ( $\theta$ ) نسبت به افق

مراجعه به آن مقاله می‌توان مشاهده نمود که در کنار گوی‌های شیشه‌ای یک‌اندازه، از ذرات یک‌اندازه  $ZrO_2$  (غیرشیشه‌ای) نیز استفاده شده است.



الف) آرایش شل



ب) آرایش متراکم

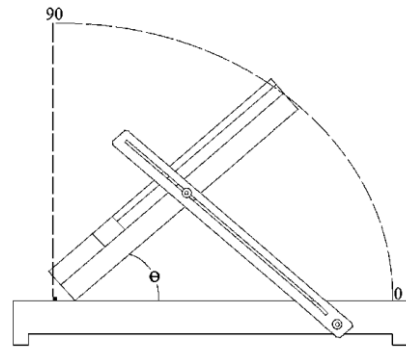
شکل ۲ نحوه چیدمان آرایش‌های شل و متراکم برای گوی‌های پلاستیکی

### روش انجام آزمایش

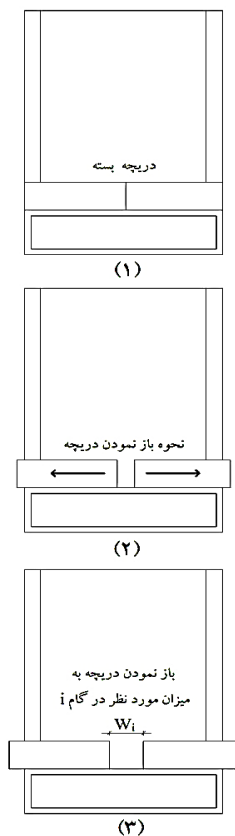
در مرجع [۵] در رابطه با ساختار دستگاه توسعه‌یافته دریاچه، کاربرد آن در شناخت پدیده قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای و نیز روش انجام آزمون، اطلاعات مناسب و کاملی ارائه شده است. با این حال، در این بخش توضیحی اجمالی پیرامون دستگاه مذکور و چگونگی انجام آزمایش ارائه می‌شود.

دستگاه توسعه‌یافته دریاچه نمونه‌ای ترکیبی و اصلاح‌شده از دستگاه ترزاقی [۵] و دستگاه گو و ژو [۳] است که بخش‌های اصلی آن مطابق شکل (۳) شامل «بستر اصلی متحرک، جعبه آزمایش، بستر تکیه‌گاهی، دستک‌های شیاردار، دو ریل افقی مدرج متحرک و یک مخزن تحتانی برای ذخیره مصالح تخلیه‌شده می‌باشد. فرض آزمایش دریاچه این است که شرایط کرنش مستوی برای محیط دانه‌ای برقرار گردد. بدین منظور،

برای انجام گام بعد، ۰/۲ سانتی متر به عرض دریچه (مربوط به گام قبل) افزوده می شود و سپس مراحل فوق دوباره اجرا می گردند. باید دانست که فرایند آزمون تا لحظه ای ادامه می یابد که همچنان قوس پایدار بر روی دریچه ایجاد گردد. بنابراین، زمانی که دیگر قوس زدگی در ذرات محیط مشاهده نشود، آزمون متوقف خواهد شد و گام پیش از انهدام قوس، به عنوان آخرین گام آزمون خواهد بود [۵].



شکل ۵ دامنه حرکت بستر اصلی دستگاه (صفر تا ۹۰ درجه)

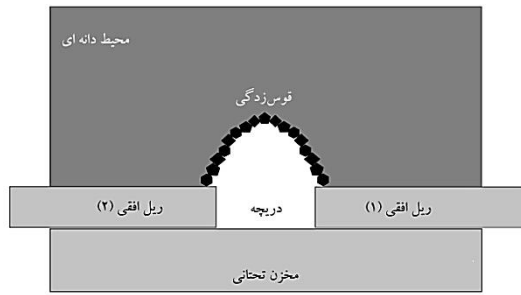


شکل ۶ راستای حرکت ریل های افقی و نمایش عرض دریچه در هر گام آزمون

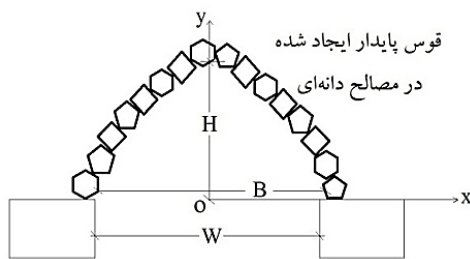
با اجرای ۲۷۶ گام آزمون بر روی گوی های پلاستیکی در آرایش شل (به ازای ده زاویه بستر شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق)، ۳۱۶ گام آزمون بر روی گوی های پلاستیکی با آرایش متراکم (به ازای ده زاویه بستر شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق) و ۱۴۲ گام آزمایش بر روی سنگریزه ها (به ازای چهار زاویه بستر شامل ۱۰، ۴۰، ۷۰ و ۹۰ درجه

برای انجام یک گام آزمون، نخست ضخامت درونی جعبه تنظیم و سپس بستر اصلی دستگاه بر روی زاویه  $(\theta)$  مورد نظر بسته می شود. در ادامه، دو ریل افقی به صورت کاملاً متقارن و به مقدار مورد نیاز بسته به شماره گام (متغیر بین صفر تا ۳۰ سانتی متر) از یکدیگر دور می شوند (شکل ۶). سپس در فضای ایجاد شده یک قطعه پلاستیکی فشرده مکعب مستطیلی شکل قرار می گیرد (که این قطعه، هم درپوش دریچه آزمایش است و هم از تخلیه مصالح به درون مخزن تحتانی پیش از شروع گام جلوگیری می کند). پس از آن، مصالح دانه ای وارد جعبه می گردند و در نهایت، درپوش به طرف پایین منتقل و به طور کامل برداشته می شود. در هر گام، یک قوس پایدار استاتیکی در محیط ایجاد می شود. شکل (۷) مراحل تدریجی انجام یک گام آزمون را نشان می دهد. در اینجا منظور از قوس پایدار، مجموعه ای از ذرات محیط است که با کنار یکدیگر قرار گرفتن آنها، شکل تقریبی یک کمان یا قوس تداعی می شود. شکل (۸) نمونه ای از تصاویر مربوط به قوس زدگی را ارائه می نماید. لازم به ذکر است که در رابطه با قوس زدگی، مرز بیرونی قوس پایدار مورد بررسی قرار می گیرد (شکل ۹). بر این اساس، اطلاعات مربوط به هر قوس شامل عرض و ارتفاع قوس، عرض دریچه متناظر باتوجه به موقعیت دستگاه مختصات دکارتی و زاویه بستر اصلی برای هر نوع مصالح دانه ای به نحوی که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، قرائت و ثبت می گردند. با ثبت داده ها گام مذکور به پایان می رسد.

نسبت به افق) و در مجموع ۷۳۴ گام آزمایش، اطلاعات مشاهده‌شده مربوط به قوس زدگی ثبت شده‌اند [۵].



شکل ۹ نمایش مرز ذرات شرکت‌کننده در قوس زدگی

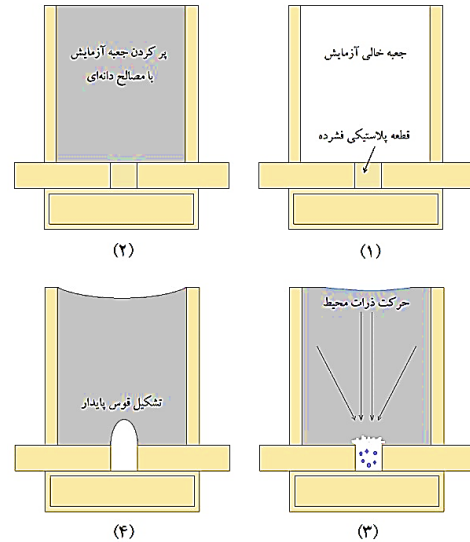


شکل ۱۰ نحوه اندازه‌گیری اطلاعات مربوط به قوس زدگی

### نتایج و تفسیر

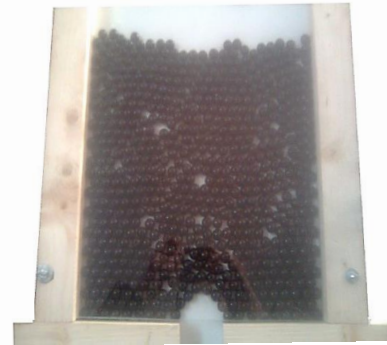
براساس داده‌های خام آزمایشگاهی، نتایج متعددی قابل استخراج و بررسی هستند که با دقت در روند وقوع هر یک، امکان تفسیر دلیل هر کدام از آنها وجود خواهد داشت. مشاهدات تجربی نشان داده‌اند که با افزایش عرض دریچه، به مقدار عرض قوس افزوده می‌گردد. همچنین، افزایش عرض دریچه سبب افزایش در ارتفاع قوس گردیده‌است [۵]. این نتایج و سایر موارد مستخرج از پژوهش [۵] برای قوس زدگی تا مرحله «قبل از انهدام قوس پایدار» در مصالح دانه‌ای بیان گردیده‌اند. با این وجود، می‌توان با تمرکز بر روی ویژگی‌های قوس پایدار در لحظه «آستانه انهدام» و رخدادهای «پس از انهدام» به نتایج نوین قابل توجهی دست یافت.

باید توجه داشت که چگالی به نوعی نمایش‌دهنده تراکم مصالح و ابعاد ذرات یک پارامتر هندسی از مجموعه محیط دانه‌ای است. در این مقاله، برای مطالعه شکل هندسی قوس پایدار، تأثیر وزن مخصوص یا



شکل ۷ مراحل طی شده در انجام یک گام آزمون: (۱) تنظیم عرض

دریچه و قرار دادن قطعه پلاستیکی فشرده (آکاستیو) در محل دریچه، (۲) وارد نمودن مصالح دانه‌ای در جعبه آزمایش، (۳) برداشتن قطعه پلاستیکی (دریچه)، (۴) ثبت اطلاعات مربوط به قوس زدگی پس از تشکیل قوس پایدار



شکل ۸ نمونه‌ای از تصاویر قوس زدگی در مصالح

ظرفیت نهایی پدیده قوس زدگی برای انتقال فشار استاتیکی محیط دانه‌ای اطراف قوس به دو تکیه‌گاه آن است. از این‌رو، آشنایی با ویژگی‌های ظاهری و مکانیکی قوس بحرانی و تفسیر سازوکار تشکیل آن، کمک شایانی به درک جامع‌تر اثر قوس زدگی در مصالح دانه‌ای خواهد نمود. شکل (۱۱) نمونه‌ای از تصویر قوس‌های بحرانی در مصالح دانه‌ای را نشان می‌دهد.



الف) گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل



ب) گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم



پ) مجموعه سنگریزه  
شکل ۱۱ نمونه‌ای از قوس‌های بحرانی

**ویژگی‌های قوس بحرانی.** بدیهی است در آخرین گام آزمون، متناظر با حداکثر عرض درپچه، عرض قوس نیز دارای مقدار بیشینه خود می‌باشد. از این‌رو، انتظار

درجه تراکم مصالح با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از گوی‌های پلاستیکی در دو آرایش متراکم و شل که هر دو دارای ابعاد ذرات ( $d_{50}$ ) یکسان بوده‌اند، بررسی شده است. از سوی دیگر، برای سنجش میزان تأثیر زاویه اصطکاک داخلی نسبت به اندازه دانه‌ها بر روی ابعاد قوس، از مقایسه نتایج حاصل از سنگریزه‌ها ( $d_{50}$  کوچک‌تر) با گوی‌های پلاستیکی در حالت متراکم ( $d_{50}$  بزرگ‌تر) استفاده شده است. تأثیر این پارامترها در عرض بحرانی درپچه براساس قطر متوسط ذرات محیط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

### آستانه انهدام قوس پایدار

منظور از آستانه انهدام قوس، آخرین گام آزمون است. به عبارت دیگر، آستانه انهدام لحظه‌ای است که در آن قوس پایدار نهایی بر روی درپچه تشکیل می‌شود و پس از آن با کوچک‌ترین افزایش در اندازه عرض درپچه، دیگر هیچ‌گونه قوس زدگی در مصالح دانه‌ای رخ نخواهد داد. بررسی‌های انجام شده حاصل از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی درپچه نشان می‌دهند که مدت زمان رسیدن به لحظه آستانه انهدام قوس در مصالح دانه‌ای آزمایش شده متفاوت است و به عوامل گوناگونی وابسته است که یافتن دلیل آنها نیازمند بحث و تفسیر زیادی می‌باشد. در ادامه به بررسی جامعی پیرامون این موضوع پرداخته می‌شود.

**تعریف قوس بحرانی.** براساس تعریف نوشتار حاضر، قوس بحرانی (Critical arch) قوس پایدار استاتیکی مربوط به آخرین گام آزمون است. این بدان معنا است که در این حالت، درپچه دارای حداکثر عرض ممکن (نسبت به گام‌های قبلی) خواهد بود. به بیان دیگر، اگر عرض درپچه از عرض درپچه متناظر با قوس بحرانی بیشتر شود، قابلیت قوس زدگی در مصالح دانه‌ای از بین خواهد رفت. بنابراین، قوس بحرانی در واقع نشان‌دهنده

دریچه و عرض قوس دارای مقادیر بیشینه خود هستند، اما ارتفاع قوس بحرانی، بیشینه نیست بلکه نسبت به گام قبل مقداری افت نموده است. این پدیده در کار پژوهشی گو و ژو [3] مشاهده نشده است. البته دلیل احتمالی آن، این است که در دستگاه آزمون گو و ژو [3] تنها از چند دریچه با عرض ثابت استفاده شده، در حالی که عرض دریچه در دستگاه توسعه یافته دریچه متغیر است.

از آنجایی که در آخرین گام آزمون، عرض دریچه حداکثر مقدار خود را دارد، نرخ خروج مصالح دانه‌ای از دریچه نیز به بالاترین مقدار ممکن افزایش می‌یابد. این پدیده سبب بروز دو رخداد هم‌زمان خواهد شد؛ اول این‌که، قفل‌شدگی دانه‌ها در یکدیگر سریع‌تر و بسیج شدن تنش‌های برشی بین ذرات محیط در فاصله قائم کمتری نسبت به دریچه انجام می‌شود، بنابراین تاج قوس هم در همان تراز واقع می‌گردد. دوم این‌که، به‌منظور ثابت ماندن حجم فضای خالی موجود زیر سطح قوس ایجادشده، قوس مجبور است از ارتفاع خود بکاهد. زیرا همواره حجم مصالح تخلیه شده با مجموع حجم فضای خالی زیر قوس و حجم حاصل از نشست سطح رویه مصالح فوقانی برابر است. لازم به‌ذکر است که این مسئله، یافته‌ای جدید در رابطه با پدیده قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای می‌باشد.

با مشاهده شکل (۱۲) باید بیان نمود که به‌طور کلی برای تمامی مصالح دانه‌ای استفاده شده در این پژوهش، هرچه زاویه بستر اصلی دستگاه بیشتر باشد، حداکثر عرض دریچه یا همان عرض بحرانی دریچه  $(W_{cr})$  برای ایجاد قوس‌زدگی کمتر شده است. به عبارت دیگر، با افزایش شیب قرارگیری ذرات محیط دانه‌ای نسبت به افق، عرض بحرانی دریچه کوچک‌تر خواهد بود. مقایسه داده‌ها با یکدیگر نشان می‌دهند که به‌ازای یک زاویه بستر ثابت دل‌خواه در بازه ۱۰ تا ۹۰ درجه نسبت به افق، همواره خواهیم داشت:

$$W_{cr}(\text{Rockfills}) > W_{cr}(\text{Beads-Dense}) > W_{cr}(\text{Beads-Loose})$$

این مسئله باتوجه به پارامتر زاویه اصطکاک داخلی

می‌رود قوس تشکیل‌شده، ساختاری کاملاً حساس نسبت به تنش‌های درونی (موجود در مصالح) یا تنش‌های القایی خارجی (نظیر فشار ناشی از ارتعاشات یا ضربه‌های کوچک احتمالی به جعبه) باشد. بنابراین، باید تا حد امکان، تمامی مراحل اجرای آزمون با کمال دقت و آرامش و با پرهیز از اعمال هرگونه ارتعاش و لرزش به دستگاه آزمایش انجام شوند.

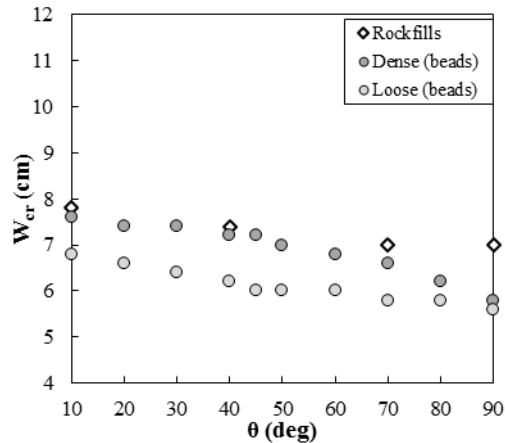
توجه به این نکته ضروری است که اگر در یک گام از آزمایش قوس‌زدگی مشاهده نشود، بدین معنی نیست که آزمون خاتمه پیدا کرده است؛ بلکه لازم است برای کنترل نتایج، ابتدا همان گام آزمون دوباره تکرار شود و سپس حداقل سه گام بعدی اجرا گردد. چنانچه در طول این سه مرحله قوس پایدار تشکیل نشد، آنگاه انجام آزمون متوقف می‌شود. در این حالت، عرض دریچه گام پیشین (قبل از سه گام کنترلی) نمایانگر عرض دریچه بحرانی است و بنابراین قوس تشکیل‌شده هم بحرانی بوده است. اما اگر در یکی از گام‌های سه‌گانه کنترل، یک قوس پایدار بر روی دریچه تشکیل شد، باید همه گام‌های آزمون تکرار شوند، زیرا احتمالاً در یکی از شرایط آزمایش مانند نحوه قرارگیری مصالح در جعبه و یا محکم کردن بستر اشکالی وجود داشته است که با انجام کنترل‌ها رفع شده‌اند. از طرفی، بروز خطاهای انسانی در ایجاد ارتعاش‌های کوچک ناشی از لرزش دست یا اعمال ضربه به جعبه آزمایش نیز ممکن است سبب ایجاد مشکل در فرایند تشکیل قوس پایدار گردیده باشند. در این حالت، ضروری است تا با فراهم نمودن شرایط نسبتاً ایده‌آل، به اجرای آزمون پرداخت.

در آزمایش‌های صورت‌گرفته در این مطالعه، پس از عدم تشکیل قوس به‌ازای یک عرض دریچه معین، برای اطمینان بیشتر به‌جای سه گام کنترل، چهار گام دیگر آزمون انجام گردیده، اما در هیچ‌یک از آنها قوس‌زدگی مشاهده نشده است. به عبارت دیگر، همه گام‌های آزمایش در صحت و دقت کامل صورت گرفته‌اند.

مشاهدات حاکی از آن هستند که اگرچه در آخرین گام آزمون یا همان لحظه تشکیل قوس بحرانی، عرض



به طور هم زمان دارای اثر مستقیم بر روی عرض بحرانی دریاچه هستند، گرچه می توان اثر زاویه اصطکاک داخلی را تا حدودی بیشتر از اثر قطر متوسط دانه ها دانست.



شکل ۱۲ عرض بحرانی (حداکثر) دریاچه به ازای زاویه های بستر

شکل (۱۳) نشان می دهد که با افزایش زاویه بستر اصلی دستگاه، عرض بحرانی قوس ( $B_{cr}$ ) کاهش یافته است. از طرف دیگر، به ازای کلیه مقادیر زاویه بستر (از ۱۰ تا ۹۰ درجه)، عرض قوس بحرانی تشکیل شده در سنگریزه ها بزرگتر از گوی های پلاستیکی در هر دو آرایش است. به عنوان نمونه، عرض قوس بحرانی ایجاد شده در سنگریزه ها، گوی های پلاستیکی با آرایش متراکم و گوی های پلاستیکی با آرایش شل، بر روی زاویه بستر ۱۰ درجه به ترتیب  $۷/۶$ ،  $۶/۵$  و  $۶/۳$  سانتی متر مشاهده گردیده است.

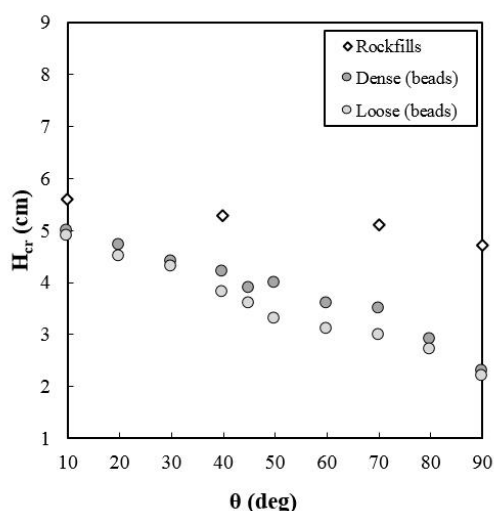
با این حال، عرض قوس بحرانی برای گوی ها اندکی متفاوت است. در بازه ۱۰ تا ۵۰ درجه زاویه بستر، عرض قوس بحرانی ایجاد شده در آرایش متراکم بیشتر از آرایش شل است، اما در بازه ۵۰ تا ۹۰ درجه، قوس بحرانی برای هر دو آرایش تقریباً با عرض یکسانی پدیدار گردیده است. به عبارت دیگر، با وجود تفاوت در زاویه اصطکاک داخلی گوی های پلاستیکی با آرایش متراکم ( $۳۷/۴$  درجه) و آرایش شل ( $۳۰/۷$  درجه)، به ازای مقادیر مختلف زاویه بستر در بازه ۵۰ تا ۹۰ درجه، نمودار تغییرات عرض بحرانی قوس برای

مصالح قابل توجه است. از آنجایی که با افزایش مقدار زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه ای، قفل شدگی ذرات در یکدیگر و بسیج شدگی تنش های برشی و در نتیجه قابلیت قوس زدگی و انتقال بار بیشتر می شود، عرض دریاچه متناظر با قوس بحرانی نیز آزادی بیشتری برای رسیدن به مقدار حداکثر بیشتر دارد. به عنوان مثال، بر روی زاویه بستر ۱۰ درجه، با توجه به اندازه زاویه اصطکاک داخلی  $۴۱/۳$ ،  $۳۷/۴$  و  $۳۰/۷$  درجه به ترتیب برای سنگریزه ها، گوی های پلاستیکی با آرایش متراکم و آرایش شل، عرض بحرانی دریاچه متناظر با مصالح دانه ای نام برده به ترتیب برابر  $۷/۸$ ،  $۷/۶$  و  $۶/۸$  سانتی متر مشاهده شده است. علاوه بر تأثیر مستقیم زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه ای بر روی  $W_{cr}$  باید توجه داشت که با وجود تفاوت در مقدار زاویه اصطکاک داخلی مجموعه سنگریزه ( $۴۱/۳$  درجه) و گوی های پلاستیکی با آرایش متراکم ( $۳۷/۴$  درجه)، نمودار تغییرات عرض بحرانی دریاچه بر حسب زاویه بستر مصالح دانه ای مربوط به سنگریزه ها و گوی های پلاستیکی با آرایش متراکم تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند. دلیل این واقعه را باید به تأثیر قطر متوسط ذرات محیط ارتباط داد. هرچه قطر متوسط ذرات بزرگتر باشد، بر روی یک زاویه بستر معین، ذرات کمتر دچار تغییر مکان های دورانی و انتقالی در حین تخلیه می شوند و در نتیجه، دستیابی دریاچه به عرض بیشتر محتمل تر خواهد شد. به عنوان مثال، بر روی زاویه بستر ۱۰ درجه نسبت به افق، اگر چه مقدار زاویه اصطکاک داخلی سنگریزه ( $۴۱/۳$  درجه) نسبت به گوی های پلاستیکی با آرایش متراکم ( $۳۷/۴$  درجه) بزرگتر است، اما از آنجایی که قطر متوسط سنگریزه ها ( $۰/۹$  سانتی متر) از گوی های پلاستیکی با آرایش متراکم ( $۱/۲$  سانتی متر) کوچکتر است، همین امر باعث کاهش عرض بحرانی دریاچه در مجموعه سنگریزه نسبت به گوی های پلاستیکی با آرایش متراکم گردیده تا جایی که منجر به مرز انطباق دو نمودار بر یکدیگر شده است. بنابراین، باید اینچنین نتیجه گیری نمود که زاویه اصطکاک داخلی و قطر متوسط ذرات مصالح دانه ای

قوس بحرانی در سنگریزه‌ها بزرگ‌تر از گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم می‌باشد و ارتفاع قوس بحرانی در گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم تقریباً بزرگ‌تر از گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل است. به عبارت دیگر، در کلیه زوایای قرارگیری بستر نسبت به افق داریم:

$$H_{cr}(\text{Rockfills}) > H_{cr}(\text{Beads-Dense}) > H_{cr}(\text{Beads-Loose})$$

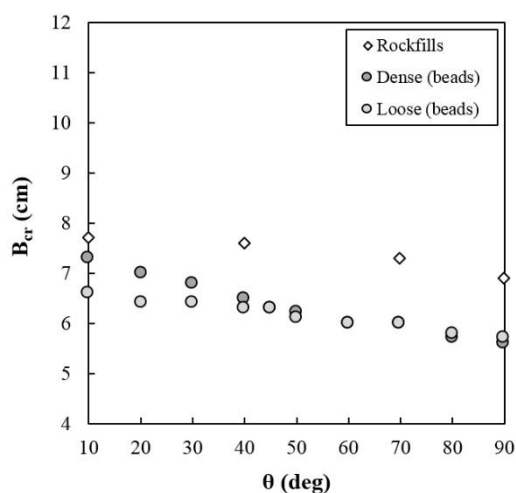
به عنوان مثال، در حالتی که بستر دستگاه با راستای افق زاویه قائم می‌سازد، ارتفاع قوس بحرانی تشکیل شده بر روی دریچه در سنگریزه‌ها، گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم و شل به ترتیب برابر ۴/۷، ۲/۳ و ۲/۲ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۱۴ ارتفاع بحرانی قوس به‌ازای زاویه‌های بستر

مطابق مشاهدات انجام‌شده در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) چنین استنباط می‌شود که در آستانه انهدام قوس پایدار، ابعاد قوس و عرض دریچه دارای رابطه مستقیم با پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و قطر متوسط مصالح هستند. مقدار زاویه اصطکاک داخلی با افزایش مقدار زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای، بسیج‌شدگی مقاومت برشی بین ذرات محیط و در نتیجه قابلیت قوس‌زدگی بیشتر می‌شود و همین امر سبب

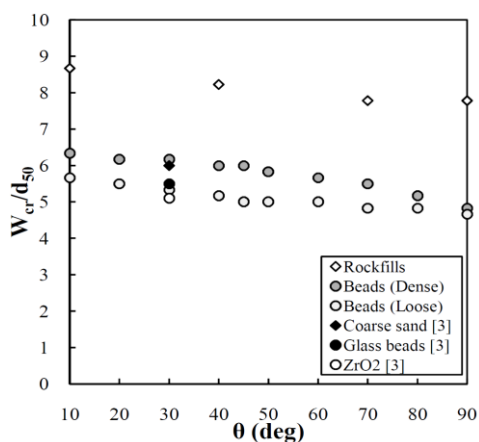
گوی‌های پلاستیکی در هر دو آرایش، با تقریب خوبی بر یکدیگر منطبق هستند. از مجموع موارد ذکرشده نتیجه گرفته می‌شود که برای هر نوع مصالح دانه‌ای در بازه دل‌خواه بین ۱۰ تا ۹۰ درجه نسبت به افق، پارامتر زاویه اصطکاک داخلی محیط در عرض قوس بحرانی دارای بیشترین تأثیر است. برای یک محیط دانه‌ای همگن (دارای ذرات هم‌اندازه) نیز در حالتی که زاویه بستر در بازه ۱۰ تا ۵۰ درجه نسبت به افق واقع شود، پارامتر زاویه اصطکاک داخلی محیط در عرض قوس بحرانی بیشترین تأثیر را دارد. اما در بازه ۵۰ تا ۹۰ درجه که شتاب ثقل اثر بیشتری در حرکت رو به پایین مصالح بر روی بستر شیب‌دار به نسبت دامنه ۱۰ تا ۵۰ درجه دارد، نقش انداز قطر دانه‌های تشکیل‌دهنده محیط در قفل‌شدگی ذرات و به تبع آن اندازه عرض بحرانی از پارامتر زاویه اصطکاک داخلی پررنگ‌تر است.



شکل ۱۳ عرض بحرانی (حداکثر) قوس به‌ازای زاویه‌های بستر

شکل (۱۴) نمودار تغییرات ارتفاع قوس بحرانی به‌ازای زاویه‌های مختلف بستر را نمایش می‌دهد. با مراجعه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه بستر مصالح دانه‌ای، از ارتفاع بحرانی قوس  $H_{cr}$  کاسته شده است. همچنین با انجام آزمایش بر روی مصالح به‌ازای یک زاویه بستر ثابت، ارتفاع

مشاهده می‌شود کمترین عرض بحرانی دریچه،  $4/7$  برابر قطر متوسط ذرات و مربوط به یک قوس پایدار در آستانه انهدام است که در گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل و در حالت قرارگیری بستر بر روی زاویه  $90$  درجه نسبت به افق تشکیل شده است. حال آن‌که، بزرگ‌ترین عرض بحرانی دریچه،  $8/67$  برابر قطر متوسط ذرات و متعلق به شرایط تشکیل یک قوس پایدار در آستانه انهدام است که در مجموعه سنگریزه بر روی زاویه بستر به اندازه  $10$  درجه ظاهر شده است.



شکل ۱۵ نسبت عرض بحرانی (حداکثر) دریچه به قطر متوسط ذرات به ازای زاویه‌های بستر

البته در ارائه رابطه (۱) باید توجه داشت که هدف این مقاله، بررسی تأثیر شکل ذرات و تیزگوشگی آنها به‌عنوان متغیر مستقل نبوده است و تأثیر این عوامل با ارتباط دادن اثر آنها بر روی پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص (درجه تراکم)، قطر متوسط ذرات و در نتیجه نقش آنها در شکل هندسی قوس ایجاد شده مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

نتایج مطالعه آزمایشگاهی حاضر، کار تحقیقاتی بر روی چند نوع مصالح دانه‌ای دیگر را شامل ماسه متراکم، مجموعه گوی‌های شیشه‌ای با قطر متوسط  $5/5$  میلی‌متر و ذرات  $ZrO_2$  که با زاویه بستر  $30$  درجه توسط گو و ژو [3] انجام شده تأیید می‌کند. مقایسه نتیجه‌ها در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با دقت

افزایش ابعاد قوس و عرض دریچه متناظر می‌گردد. این بدان معنی است که عرض و ارتفاع قوس بحرانی هم زیادتر می‌شود. اما زاویه قرارگیری بستر مصالح دانه‌ای نسبت به افق تأثیر عکس بر روی ابعاد قوس و عرض دریچه دارد. با افزایش زاویه قرارگیری بستر محیط نسبت به افق، «اثر شتاب ثقل» بر روی مجموعه مصالح دانه‌ای بیشتر می‌شود. نخست، این امر سبب می‌شود که دبی خروج مصالح دانه‌ای از دریچه زیادتر شود. بنابراین، به دریچه اجازه کمتری برای باز شدن تا حد رسیدن به حداکثر مقدار در مقایسه با یک زاویه بستر کوچک‌تر داده خواهد شد. از این‌رو، حداکثر عرض دریچه یا همان عرض بحرانی دریچه کمتر است و به تبع آن عرض قوس بحرانی هم کوچک‌تر خواهد بود. دوم این‌که، با افزایش اثر شتاب گرانش، به قوس بحرانی ایجاد شده فشار سربار بیشتری اعمال می‌شود. در این حالت اگر قوس به‌صورت یک تیر خمیده تحت بارگذاری گسترده از محیط پیرامونی در نظر گرفته شود، تغییر مکان رو به پایین (خیز) بیشتری پیدا می‌کند و به عبارت دیگر، کاهش ارتفاع می‌یابد.

باید توجه نمود که تمرکز ویژه بر روی مفهوم قوس بحرانی، برای نخستین بار در پژوهش حاضر انجام شده است.

پیش‌بینی حداکثر عرض دریچه یک مخزن مرتبط با مصالح دانه‌ای با توجه به ویژگی‌های محیط از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر قطر متوسط مجموعه به‌عنوان یک پارامتر مشخص از مصالح دانه‌ای در نظر گرفته شود، می‌توان مطابق شکل (۱۵) نسبت حداکثر عرض دریچه (عرض دریچه بحرانی) را به قطر متوسط اجزای محیط محاسبه نمود. با مراجعه به شکل مذکور، رابطه (۱) قابل بیان است:

$$4.7 \leq \frac{W_{cr}}{d_{50}} \leq 8.67 \quad (1)$$

در این رابطه:

$W_{cr}$ : عرض دریچه بحرانی (حداکثر عرض دریچه).

$d_{50}$ : قطر متوسط ذرات محیط دانه‌ای.

آستانه انهدام قوس پایدار نشان می‌دهد که نتایج حاصل از گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل و متراکم به‌عنوان مدلی برای شبیه‌سازی ذرات تشکیل‌دهنده یک محیط دانه‌ای در رابطه با شناخت اثر قوس‌زدگی در آستانه انهدام قوس پایدار قابل اعتماد هستند.

### پس از انهدام قوس پایدار

هدف از بررسی وضعیت مصالح دانه‌ای پس از انهدام قوس‌زدگی، تحلیل رفتار اجزای محیط و احتمالاً یافتن سازوکارهای جدید در رابطه با مکانیک محیط‌های گسسته است. همان‌طور که پیشتر بیان گردید، اگر دریچه بیشتر از عرض حداکثر یا همان عرض بحرانی دریچه باز شود، به‌هیچ‌وجه قوس پایدار در محیط ایجاد نمی‌گردد و مصالح دانه‌ای تا جایی که امکان دارد از محل دریچه خارج می‌شوند و به درون مخزن تحتانی سقوط می‌کنند. در واقع این لحظه، پایان قوس‌زدگی در محیط دانه‌ای را تداعی می‌کند. اما این نکته که حد تخلیه مصالح دانه‌ای تا کجا ادامه می‌یابد، موضوعی است که در این بخش به آن پرداخته می‌شود.

**وضعیت مصالح تخلیه‌شده.** پیش از انهدام قوس پایدار و همچنین در آستانه آن، مطابق شکل (۱۶)، حجم مصالح تخلیه‌شده که در مخزن تحتانی سقوط می‌کنند، برابر است با مجموع حجم واقع در فضای خالی سطح زیر قوس تشکیل‌شده تا تراز بالایی دریچه ( $y=0$ )، به‌اضافه حجمی که در اثر نشست سطح فوقانی مصالح دانه‌ای ایجاد می‌شود. رابطه (۲) این تعادل حجم را بیان می‌نماید:

$$V_d = V_s + V_a \quad (2)$$

$V_d$ : حجم مصالح تخلیه‌شده در مخزن تحتانی.

$V_s$ : حجم فضای خالی ناشی از نشست سطح فوقانی مصالح.

$V_a$ : حجم فضای خالی محدود به قوس پایدار و تراز بالایی دریچه.

با تشکیل قوس پایدار، تخلیه مصالح دانه‌ای از

بیشتر در این شکل یک نکته مهم قابل بیان است و آن این که عرض بحرانی دریچه برای مجموعه سنگریزه در پژوهش حاضر هم نسبت به گوی‌های پلاستیکی با دو آرایش و هم در مقایسه با مصالح مورد استفاده در مطالعه گو و ژو [3] بزرگ‌تر است. علت احتمالی این موضوع، بزرگ‌تر بودن چگالی ( $\rho$ ) مجموعه سنگریزه نسبت به سایر مصالح مورد بررسی است که تأثیر خود را این‌گونه بروز داده است.

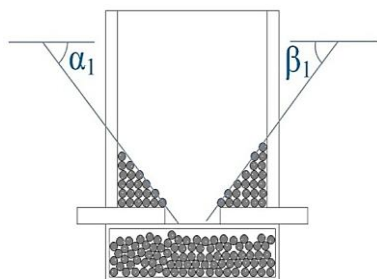
بر اساس مطالب بیان‌شده، می‌توان دو کاربری برای پدیده قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای تعریف نمود. با بهره‌گیری از پدیده قوس‌زدگی به‌عنوان یک «عامل مثبت» در انتقال بار، می‌توان با توجه به عرض حفره‌ای که قرار است در مصالح دانه‌ای ایجاد گردد، ابعاد ایمن آن را بدون نیاز به حایل‌بندی در شرایط برقراری کرنش مستوی محاسبه نمود. به‌عنوان مثال، می‌توان ابعاد مربوط به محل عبور یک سازه مدفون نظیر یک لوله یا تونل بدون حایل در خاک ماسه‌ای را محاسبه نمود. از سوی دیگر، می‌توان شرایطی را ایجاد کرد تا از بروز پدیده قوس‌زدگی به‌عنوان یک «عامل مزاحم» در ایجاد قوس پایدار بر روی خروجی مصالح جلوگیری شود. بارها مشاهده شده است که در اثر ایجاد قوس‌زدگی در ذرات موجود در مخازن نگهداری مصالح نظیر سیلوها و قیف‌ها، فرایند تخلیه آنها از محل خروجی متوقف می‌شود و با مشکل روبه‌رو می‌گردد. بنابراین، باید شرایطی را فراهم آورد تا مصالح امکان تشکیل قوس پایدار بر روی محل خروجی را نداشته باشند. با توجه به مطالب بیان‌شده در این بخش، اگر عرض خروجی مصالح، اندکی بزرگ‌تر از عرض بحرانی دریچه انتخاب شود، به‌هیچ‌وجه قوس‌زدگی ایجاد نخواهد شد و ذرات مخزن بدون بروز مشکل تخلیه می‌گردند. از این‌رو، می‌توان برای کاربرد عملی مفهوم عرض بحرانی دریچه به طراحی ابعاد دهانه خروجی مخزن سازه‌هایی مانند سیلوها و قیف‌های ذخیره‌کننده مصالح دانه‌ای نظیر مخازن نگهداری غلات و مواد غذایی با ماهیت غیرچسبنده نظیر دانه‌های گندم یا جو اشاره نمود. بررسی نتایج به‌دست آمده پیرامون وقایع مرتبط با

### وضعیت مصالح باقی مانده در جعبه. مشاهدات

آزمایشگاهی نشان می‌دهند که پس از انهدام قوس پایدار، مصالح دانه‌ای باقی مانده درون جعبه آزمایش تقریباً به صورت متقارن بر روی دو ریل افقی طرفین دریاچه قرار می‌گیرند. به عنوان نمونه به شکل (۱۸) مراجعه شود. از مجموع شکل (۱۶) و (۱۸) می‌توان نتیجه گرفت که:

$$V_{r(1)} \approx V_{r(2)}$$

نکته قابل توجه دیگر آن است که آرایش هر یک از این توده‌ها، با تقریب بسیار خوبی نسبت به آرایش اولیه، ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین می‌توان هر یک از آنها را «توده ایستای مصالح» نامید. شکل (۱۹) زاویه راستای مرز خارجی توده ایستای مصالح باقی مانده نسبت به افق را به صورت شماتیک نمایش داده است. در این شکل،  $\alpha_i$  زاویه شیب توده مصالح واقع بر روی ریل سمت چپ نسبت به افق و  $\beta_i$  زاویه شیب توده مصالح بر روی ریل سمت راست نسبت دریاچه نسبت به افق است. به عبارت دیگر، در شکل (۱۹)، شش زاویه شامل زاویه شیب مرز توده ایستای گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل ( $\alpha_1$ )، آرایش متراکم ( $\alpha_2$ ) و مجموعه سنگریزه ( $\alpha_3$ ) واقع بر روی ریل سمت چپ نسبت به افق و زاویه شیب مرز توده ایستای گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل ( $\beta_1$ )، آرایش متراکم ( $\beta_2$ ) و مجموعه سنگریزه ( $\beta_3$ ) واقع بر روی ریل سمت چپ نسبت به افق قابل رؤیت هستند.



الف) گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل

دریاچه متوقف می‌شود و این تعادل حجم برقرار می‌گردد، اما پس از انهدام قوس، مطابق شکل (۱۷)، حجم مصالح درون مخزن تحتانی از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$V_d = V_t - (V_{r(1)} + V_{r(2)}) \quad (3)$$

در این رابطه:

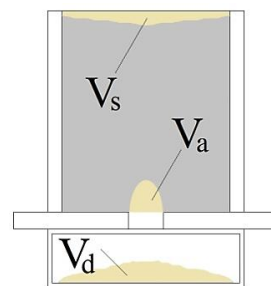
$V_d$ : حجم مصالح تخلیه شده در مخزن تحتانی.

$V_t$ : حجم کل مصالح درون جعبه آزمایش پیش از انجام آزمون.

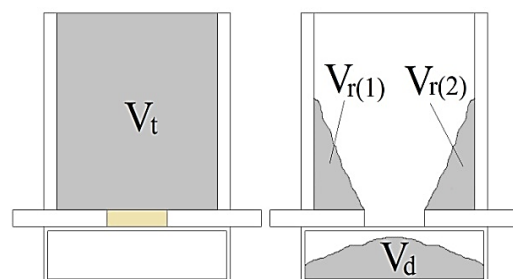
$V_{r(1)}$ : حجم مصالح باقی مانده در جعبه آزمایش، واقع در سمت چپ دریاچه.

$V_{r(2)}$ : حجم مصالح باقی مانده در جعبه آزمایش، واقع در سمت راست دریاچه.

باتوجه به حجم مصالح تخلیه شده در هر گام آزمایش می‌توان به تحلیل فشار استاتیکی اعمالی به قوس ناشی از مصالح موجود در جعبه و سازوکار انتقال بار حاصل از پدیده قوس زدگی پرداخت.



شکل ۱۶ محاسبه حجم مصالح تخلیه شده در هر گام آزمون پیش از انهدام قوس پایدار



شکل ۱۷ محاسبه حجم مصالح تخلیه شده در هر گام آزمون پس از انهدام قوس پایدار

اندازه‌گیری زوایای تشکیل‌شده نشان می‌دهد که با افزایش شتاب ثقل مؤثر بر محیط ناشی از افزایش زاویه بستر اصلی ( $\theta$ )، زاویه توده ایستای مصالح نسبت به افق ( $\alpha_i$  و  $\beta_i$ ) افزایش یافته است. جدول (۱) اندازه زاویه توده ایستا نسبت به افق را برای مصالح دانه‌ای آزمایش نشان می‌دهد. مطابق این جدول، مشاهده می‌شود که در هر محیط، مقادیر هر دو زاویه به‌ازای یک زاویه بستر اصلی معین، با تقریب بسیار خوبی با یکدیگر برابر هستند. به عبارت دیگر، برای هر محیط دانه‌ای به‌ازای یک زاویه بستر معین مشاهده شده است که:

$$\alpha_i \approx \beta_i \quad i=1, 2, 3$$

به منظور سادگی، می‌توان به‌جای بررسی زوج ( $\alpha_i, \beta_i$ )، میانگین مقادیر  $\alpha_i$  و  $\beta_i$  را محاسبه نمود و مطابق شکل (۲۰) در قالب پارامتر  $\gamma$  مورد مطالعه قرار داد. در شکل (۲۱) مقادیر اندازه‌گیری‌شده برای زاویه توده ایستا نسبت به افق ( $\gamma$ ) در مصالح دانه‌ای نشان داده شده‌اند. با برازش بهترین منحنی (Trendline) از میان داده‌های مربوط به مقادیر زاویه توده ایستای قرائت‌شده در شکل (۲۱)، می‌توان به‌طور تجربی رابطه (۴) را با  $R^2 = 0.934$  استخراج نمود:

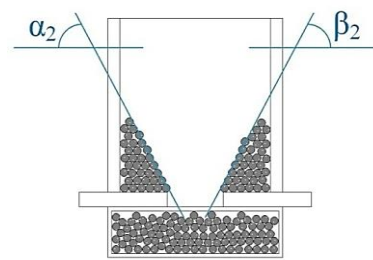
$$\gamma \approx \left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \cdot \left(\frac{\theta}{32.6}\right)^{0.14} \quad (4)$$

در این رابطه:

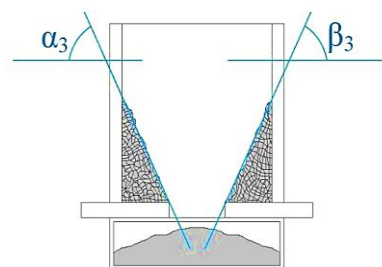
$\gamma$ : زاویه توده ایستای مربوط به مصالح باقی‌مانده در جعبه نسبت به افق برحسب درجه.

$\phi$ : زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای برحسب درجه.

$\theta$ : زاویه قرارگیری بستر اصلی دستگاه نسبت به افق برحسب درجه.



(ب) گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم



(پ) مجموعه سنگریزه

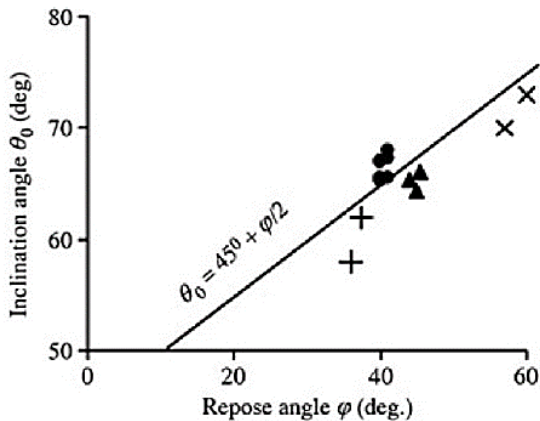
شکل ۱۹ نمایش شماتیک زاویه توده‌های ایستا نسبت به افق

جدول ۱ مقادیر زاویه توده ایستای مصالح دانه‌ای نسبت به افق به‌ازای زاویه‌های بستر

$\theta$ (deg)	Beads (Loose)		Beads (Dense)		Rockfills	
	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\alpha_3$	$\beta_3$
10	51	50	54	55	56	55
20	55	55	61	61	-	-
30	60	61	63	62	-	-
40	62	61	66	66	68	68
45	63	63	67	67	-	-
50	64	65	68	69	-	-
60	66	66	70	70	-	-
70	68	69	71	72	74	75
80	69	69	73	73	-	-
90	70	70	74	75	77	77

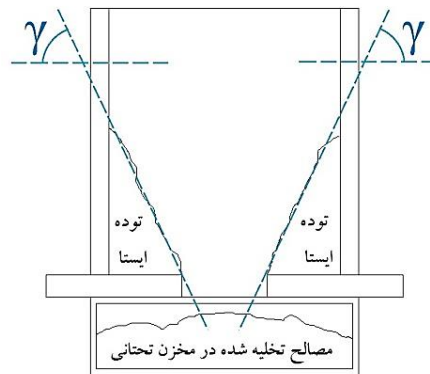
توجه ۱: واحد تمامی اعداد جدول درجه است.  
توجه ۲: اعشار اعداد رو به بالا گرد شده‌اند.  
توجه ۳: برای مجموعه سنگریزه‌ها آزمون فقط بر روی زوایای بستر ۱۰، ۴۰، ۷۰ و ۹۰ درجه انجام شده است.

البته اندازه و شرایط بروز این زاویه فقط در شرایط وجود قوس زدگی بررسی شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که توده ایستا هم در شرایط وقوع قوس زدگی و هم پس از انهدام قوس پایدار، دارای زاویه‌ای برابر با مقدار به دست آمده از رابطه (۴) است.

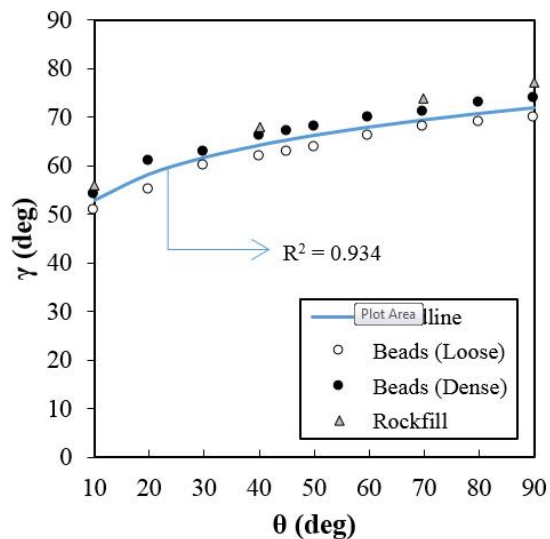


شکل ۲۲ رابطه زاویه انحراف توده ایستا [3]

برای صحت‌سنجی رابطه (۴)، اگر مقدار ۳۰ درجه، یعنی زاویه بستر دستگاه آزمون گو و ژو [3]، برای  $\theta$  جایگزین شود، زاویه توده ایستا نسبت به افق برحسب درجه برابر  $(45^\circ + \phi/2) \cdot 0.9884$  به دست می‌آید. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که  $\theta_0 \approx \gamma(\theta=30\text{degree})$ . این رابطه نشان می‌دهد که رابطه (۴) با تقریب بسیار خوبی رابطه زاویه انحراف توده ایستا در کار گو و ژو [3] را تأیید می‌کند. البته با مراجعه به شکل (۲۳) که در آن، مقادیر زاویه توده ایستا نسبت به افق به کمک رابطه (۴) برای مصالح دانه‌ای با زاویه اصطکاک داخلی در بازه ۳۰ تا ۶۰ درجه قابل تخمین هستند، نیز صحت این ادعا اثبات می‌شود.



شکل ۲۰ راستای توده ایستا نسبت به افق برای یک محیط دانه‌ای



شکل ۲۱ مقادیر زاویه توده ایستای مصالح به‌ازای زاویه‌های بستر

بر اساس رابطه (۴)، زاویه  $\gamma$  تابع زاویه اصطکاک داخلی مصالح و شتاب مؤثر بر محیط دانه‌ای است و راستای قرارگیری بخشی از محیط را نشان می‌دهد که در حین تخلیه شدن مصالح به درون دریچه، ذرات موجود در آن ناحیه بدون تغییر قابل توجه نسبت به وضعیت ابتدایی باقی می‌مانند. در مطالعه گو و ژو [3]، پارامتری به نام زاویه انحراف (Inclination angle) مرز توده ایستا (Stagnant mass) وجود دارد که مبین وضعیت قرارگیری مصالح در حین تخلیه شدن از دریچه می‌باشد و مطابق شکل (۲۲)، رابطه‌ای به صورت

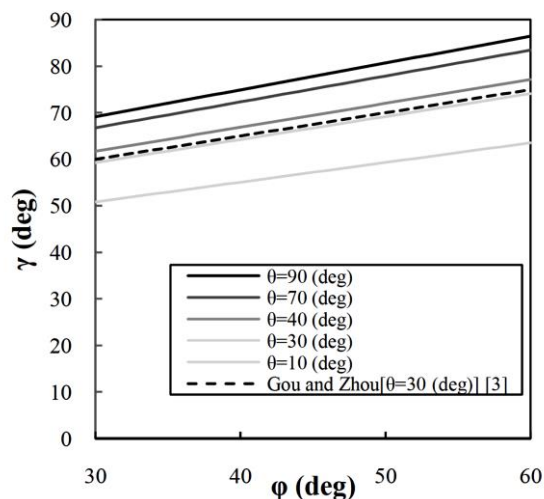
پلاستیکی با سنگریزه‌ها حاکی از آن است که در رابطه با قوس زدگی پس از انهدام قوس پایدار نیز، گوی‌های پلاستیکی در هر دو آرایش به‌خوبی رفتار اجزای یک محیط دانه‌ای واقعی را مدل‌سازی نموده‌اند. نتایج به‌دست آمده در این بخش، مفاهیم جدیدی در بحث مکانیک یک محیط دانه‌ای با ماهیت اجزای مجزا ارائه نمود که می‌تواند پایه‌گذار شناخت بیشتر رفتار مصالح دانه‌ای گردد.

### نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از مشاهدات آزمایشگاهی در رابطه با اثر قوس زدگی در دو حالت زمانی متمایز قابل بیان هستند:

الف) در آستانه انهدام قوس و پایان قوس زدگی؛ برای هر یک از مصالح و به‌ازای هر زاویه بستر اصلی دستگاه نسبت به افق، به آخرین قوس پایدار ایجادشده بر روی دریچه‌ای با حداکثر عرض ممکن، قوس بحرانی گفته می‌شود. حداکثر عرض ممکن برای باز شدن دریچه برحسب زاویه اصطکاک داخلی و زاویه بستر مصالح دانه‌ای، حدوداً  $4/7$  تا  $8/67$  برابر قطر متوسط ذرات محیط، مشاهده شده است. به بیان دیگر، در صورتی که عرض دریچه از این حد بیشتر شود، دیگر هیچ‌گونه قوسی تشکیل نخواهد شد. از این‌رو، قوس بحرانی ظرفیت نهایی پدیده قوس زدگی را برای انتقال فشار استاتیکی از مصالح دانه‌ای اطراف قوس به دو تکیه‌گاه آن نشان می‌دهد. همچنین، مشاهدات صورت‌گرفته حاکی از آن هستند که گرچه عرض دریچه و عرض قوس متناظر با قوس بحرانی دارای مقادیر بیشینه ممکن هستند، اما ارتفاع قوس بحرانی نسبت به گام پیشین، نه‌تنها روند افزایش خود را ادامه نمی‌دهد، بلکه در کلیه گام‌ها کاهش یافته است.

ب) پس از انهدام قوس؛ بخشی از ذرات محیط پس از



شکل ۲۳ تخمین مقدار زاویه توده ایستا به‌ازای مقادیر زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای در بازه ۳۰ تا ۶۰ درجه

با این وجود، زاویه توده ایستا می‌تواند به‌نوعی تداعی‌کننده زاویه دیواره شیب‌دار تحتانی و منتهی به دهانه خروجی سیلوها و قیف‌ها در حین جریان توده‌ای (mass flow) یا جریان قیفی (funnel flow) باشد (به مرجع [۱۷] مراجعه شود). مفهوم این یافته آن است که وضعیت قسمتی از مصالح دانه‌ای در دو طرف دریچه که می‌توان همه آنها را «توده ایستا» نام‌گذاری نمود، در زمان‌های متفاوت انجام آزمایش، یعنی حین تخلیه مصالح دانه‌ای، در لحظه تشکیل قوس پایدار و همچنین پس از انهدام قوس، ثابت است و مقدار زاویه راستای مرز هر یک از آنها نسبت به افق از رابطه (۴) تبعیت می‌کند. در واقع، هر یک از این توده‌های ایستا مناطقی هستند که هر کدام به‌عنوان یک سطح لغزش برای لغزیدن مصالح دانه‌ای متأثر از باز شدن دریچه به‌کار می‌روند. به‌عبارت دیگر، این سطوح لغزشی مرز بین توده ایستا و توده مصالح دانه‌ای در حال تسلیم تحت تأثیر قوس زدگی هستند. بنابراین می‌توان اینچنین نتیجه گرفت که توده ایستا منطقه‌ای از مصالح دانه‌ای است که پدیده قوس زدگی هیچ‌گونه تأثیری بر وضعیت آن ندارد. هماهنگی خوب موجود بین نتایج حاصل از گوی‌های



قوس، وضعیت «توده ایستا» ثابت و مقدار راستای مرز آن نسبت به افق قابل محاسبه است. توده‌های ایستا مناطقی هستند که هر کدام به‌عنوان یک سطح لغزش برای لغزیدن مصالح دانه‌ای متأثر از باز شدن دریاچه به‌کار می‌روند. این سطوح لغزشی مرز بین توده ایستا و توده مصالح دانه‌ای در حال جابه‌جایی رو به پایین هستند. به‌عبارت دیگر، توده ایستا منطقه‌ای از مصالح دانه‌ای است که پدیده قوس زدگی هیچ‌گونه تأثیری بر وضعیت آن ندارد.

فروپاشی آخرین قوس پایدار، درون مخزن تحتانی تخلیه می‌شوند. اما قسمتی از مصالح دانه‌ای درون جعبه باقی می‌مانند که تقریباً به‌صورت متقارن در روی دو ریل افقی طرفین دریاچه قرار می‌گیرند. آرایش هر یک از توده‌های باقی‌مانده در طرفین دریاچه، با تقریب بسیار خوبی نسبت به آرایش اولیه پیش از انجام آزمایش، ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. در زمان‌های متفاوت انجام آزمایش، یعنی حین تخلیه مصالح دانه‌ای، در لحظه تشکیل قوس پایدار و همچنین پس از انهدام

## مراجع

1. Pugnaloni, L.A. and Barker, G.C., "Structure and Distribution of Arches in Shaken Hard Sphere Deposits", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 337, No.3, pp. 428-442, (2004)
2. Michalowski, R.L. and Park, N., "Arching in granular soils", *First Japan-U.S. Workshop on Testing, Modeling, and Simulation*, Boston, Massachusetts, United States, (2005).
3. Guo, P. and Zhou, S., "Arch in Granular Materials as a Free Surface Problem", *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*, Vol. 37, No. 9, pp. 1048-1065, (2012).
4. Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A, Lodder, H.J. van Tol, A.F., "Model Experiments on Piled Embankments, Part I", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 32, pp. 69-81, (2012).
5. احمدی، ع، سیدی حسینی نیا، ا، «بررسی آزمایشگاهی اثر قوس زدگی در مصالح دانه ای به کمک دستگاه تو سعه یاف ته دریاچه»، نشریه مهندسی عمران فردوسی مشهد، دوره ۲۷، شماره صفحه: ۱۷-۳۰، (۱۳۹۵).
6. Shelke, A., and Mishra, S., "Uplift Capacity of Single Bent Pile and Pile Group Considering Arching Effects in Sand", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 337-347, (2010).
7. Jiang, Y.J. and Towhata, I., "Experimental Study of Dry Granular Flow and Impact Behavior Against a Rigid Retaining Wall", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 46, No. 4., pp. 1-17, (2012).
8. Qiu, G. and Grabe, J."Active Earth pressure shielding in quay wall constructions: numerical modeling". *Acta Geotechnica*, Vol. 7, No. 4, pp. 343-355, (2012).
9. Lee, J. and Eun, J., "Estimation of Bearing Capacity for Multiple Footings in Sand", *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, No. 6, pp. 1000-1008, (2009).
10. Zhang, Z.X., Zhang, H. and Yan, J.Y., "A Case Study on the Behavior of Shield Tunneling in Sandy Cobble Ground", *Environmental Earth Sciences*, Vol. 69, No. 6, pp. 1-10, (2012).

11. Chen, R. P., Li, J., Kong, L.G, Tang, L., "Experimental Study on Face Instability of Shield Tunnel in Sand", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 33, pp. 12-21, (2013).
12. Zhang, N., He, M. and Liu, P., "Water Vapor Sorption and its Mechanical Effect on Clay-bearing Conglomerate Selected from China", *Engineering Geology*, Vol. 141-142, pp. 1-8, (2012).
13. Zhang, L., Zhao, M. H. and He, W., "Working Mechanism of Two-direction Reinforced Composite Foundation", *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 14, No. 4, pp. 589-594, (2007).
14. Li, S.J., Chen, J. and Feng, X.T., "Analytic Solution to Soil Arching Effect and its Application Based on Interaction of Slope Soil and Piles", *Materials Research Innovations*, Vol. 15, No. 1, pp. 578-581, (2011).
15. Deb, K., "A Mathematical Model to Study the Soil Arching Effect in Stone Column-supported Embankment Resting on Soft Foundation Soil", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 12, pp. 3871-3883, (2010).
16. Tien , H. J., "A Literature Study of the Arching Effect", Msc thesis, *Massachusetts Institute of Technology*, (1996).
۱۷. احمدی، ع.، «بررسی آزمایشگاهی پدیده قوس زدگی در مصالح دانه‌ای به کمک دستگاه توسعه یافته درجه»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۲).
18. Rao, K.K. and Nott, P.R., "An Introduction to Granular Flow", *Cambridge University Press*, (2008).