

بررسی آزمایشگاهی عرض و ارتفاع قوس تشکیل شده در مصالح دانه‌ای با استفاده از دستگاه توسعه یافته دریچه

علی احمدی^۱، سید احسان سیدی حسینی نیا^۲

۱- دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران

۲- دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران

:

ali.ahm001@yahoo.com

خلاصه

این مقاله به بررسی آزمایشگاهی پدیده 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 بر حسب 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. ضمناً حداکثر عرض دریچه با توجه به زاویه اصطکاک داخلی و زاویه بستر مصالح حدوداً ۵ تا ۸/۶ برابر قطر متوسط ذرات محیط دانه‌ای بدست آمده است.

کلمات کلیدی: قوس زدگی، مصالح دانه‌ای، دریچه، عرض قوس، ارتفاع قوس

۱. مقدمه

قوس زدگی یکی از متداول‌ترین پدیده‌های موجود در مصالح دانه‌ای است. ترزاقی [۱] اثر قوس زدگی را به صورت انتقال فشار از یک توده خاک در حال تسلیم به بخش‌های پایدار مجاور تعریف کرد که ناشی از بسیج شدن مقاومت برشی بین ذرات است که در واقع حاصل جابجایی نسبی در مصالح دانه‌ای می‌باشد. او با ابداع دستگاه آزمایش دریچه به تفسیر مفهوم قوس زدگی به معنای 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 [۲]، تحلیل و طراحی تونل‌ها [۳-۷]، مقاومت باربری شمع‌ها [۸]، نشست خاکریزهای متکی به شمع [۹]، بار موجود بر روی سازه‌های مدفون [۱۰] و جریان دانه‌ای در قیف‌ها و سیلواها [۱۱] انجام شده است. برای آشنایی بیشتر با پدیده قوس زدگی مطالعه مرجع [۱۲] پیشنهاد می‌شود. در تمامی موارد فوق‌الذکر، به دلیل آنکه منطقه تحت تأثیر انتقال فشار قوسی شکل می‌باشد نام قوس زدگی برای این پدیده انتخاب شده است. با این وجود، قوس زدگی به معنای ایجاد ساختاری پایدار به صورت یک قوس نیز قابل تعریف است. برای نشان دادن این مفهوم، گو و ژو [۱۳] 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 نقاط ضعف این دستگاه شمرده می‌شود. با بهره‌گیری از این ایده و برای رفع این نقاط ضعف، یک دستگاه طراحی و ساخته شده است که می‌تواند امکان تشکیل قوس در مصالح دانه‌ای گوناگون دارای ذراتی با قطرهای دلخواه را فراهم نماید. بستر مصالح در این دستگاه 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

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و مهندسی پی

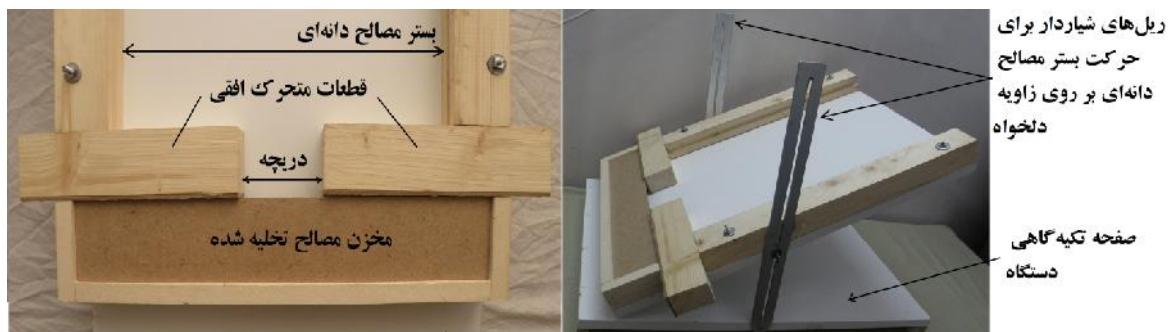
^۲ استادیار گروه مهندسی عمران

حداکثر عرض دریاچه را که بر روی آن قوس زدگی ایجاد می‌شود بدست آورد. باید دانست گاهی در سازه‌هایی نظیر قیف‌ها و سیلوهای نگهداری مصالح دانه‌ای، به دلیل ایجاد قوس بر روی محل خروجی، عمل تخلیه مصالح با مشکل رو برو می‌شود. معمولاً برای جلوگیری از بروز چنین پدیده‌ای، اندازه بازشو را تا حدودی بزرگ انتخاب می‌کنند تا امکان تشکیل قوس وجود نداشته باشد. این امر در سازه‌هایی دارای زاویه مایل نسبت به افق منجر به افزایش هزینه طراحی و گاهی سبب افزایش بیش از حد دبی خروجی مصالح می‌گردد. بنابراین دقت در انتخاب اندازه بهینه بازشوی این سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و نتایج این پژوهش کمک شایان توجهی به این مسأله خواهد نمود.

۲. آزمون آزمایشگاهی دریاچه

۱.۲ آزمون توسعه یافته دریاچه

دستگاه دریاچه گو و ژو [۱۳] فقط برای قرارگیری بستر مصالح دانه‌ای با زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق و عرض دریاچه ثابت قابل استفاده است. اما دستگاه ساخته شده که در واقع حالت توسعه یافته این دستگاه است، علاوه بر داشتن دریاچه‌ای متغیر می‌تواند بر روی زوایای بین صفر تا ۹۰ درجه نسبت به افق تنظیم شود. جعبه آزمایش در واقع فضای بین یک تخته چوبی ملامینه و یک شیشه ضدضربه است که از سمت راست و چپ توسط دو قطعه چوبی مهار شده و از پایین به دو قطعه چوبی متحرک مجاور یکدیگر محدود گردیده و از طرف بالا به منظور ورود مصالح باز می‌باشد. ابعاد این جعبه ۴۰ × ۳۰ سانتیمتر و ضخامت آن هم با توجه به اندازه قطر مصالح قابل تنظیم است. البته باید توجه داشت که این ضخامت طوری انتخاب می‌شود که اولاً مصالح فقط در یک لایه ریخته شوند تا شرایط کرنش مستوی برقرار گردد و ثانیاً به اندازه یک میلیمتر از قطر هر دانه بیشتر باشد تا مصالح بتوانند بدون هیچ گونه اصطکاکی با بستر چوبی و شیشه محافظ تخلیه شوند. ضمناً یک مخزن کوچک در انتهای بستر و دقیقاً در زیر قطعات چوبی افقی تعبیه شده که دارای دو کاربرد است. اولاً نقش ریلی برای حرکت افقی و هماهنگ قطعات چوبی برای ایجاد دریاچه را دارد و ثانیاً محل نگهداری مصالح دانه‌ای خارج شده از دریاچه می‌باشد. شکل ۱ دستگاه توسعه یافته آزمون دریاچه را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - دستگاه توسعه یافته دریاچه

۲.۲ مصالح دانه‌ای مورد استفاده

در این آزمایش از دو نوع مصالح استفاده شده است. اول، مجموعه‌ای سنگریزه^۱ با قطر متوسط نه میلیمتر و دوم، نوعی دانه تسییح پلاستیکی^۲ تقریباً کروی با سطح کاملاً صیقلی با قطر ۱۲ میلیمتر. از آنجایی که قرار است برای مقایسه نتایج بدست آمده، کار آزمایشگاهی انجام شده دارای دقت بالایی باشد، در مورد سنگریزه‌ها باید گفت که ابتدا مجموعه‌ای از سنگریزه‌هایی کاملاً تمیز به اندازه‌ای که جعبه آزمایش را پر کنند انتخاب شده‌اند. سپس کل این مصالح از جعبه خارج شده و وزن آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. بدین ترتیب با داشتن وزن سنگریزه‌ها می‌توان وزن مخصوص آن را بدست آورد و در هر گام انجام آزمایش برای برقرار نمودن شرایط مساوی، از همان مقدار سنگریزه استفاده کرد تا وزن مخصوص ثابت باقی بماند. مطابق مطالب ذکر شده در بخش ۱.۲ بایستی ضخامت جعبه آزمایش حداقل ۱۰ میلیمتر و ابعاد جعبه برابر ۱ × ۴۰ × ۳۰ سانتیمتر باشد تا اثر اصطکاک تا حد بسیار زیادی برابر صفر گردد. بنابراین، وزن مخصوص سنگریزه‌ها از رابطه (۱) قابل محاسبه است:

$$\rho(\text{Rockfills}) = \frac{\text{mass}}{\text{volume}} = \frac{1900}{30 \times 40 \times 1} = 1.58 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \quad (1)$$

از طرفی در این آزمایش برای بررسی اثر تراکم گوی‌های پلاستیکی بر روی پدیده قوس‌زدگی، مصالح با دو آرایش خاص درون جعبه

¹ Rockfills

² Beads

دستگاه قرار می گیرند. در چیدمان اول که به عنوان آرایش متراکم^۱ (شکل ۲-الف) شناخته می شود، ابتدا دانه ها 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. اما در چیدمان دوم به عنوان آرایش شل^۲ (شکل ۲-ب)، ابتدا دانه ها در اولین ردیف ریخته می شوند و سپس هر دانه دقیقاً روی دانه ردیف زیرین گذاشته می شود. بدیهی است که دستیابی به این دو آرایش کاری بس دشوار بوده و نیاز به تمرکز و دقت بالایی دارد. باید دانست که جعبه با آرایش اول (متراکم) حدود ۵۰ دقیقه و با آرایش دوم (شل) حدود ۹۰ دقیقه به طول می انجامد. در مورد این مصالح نیز باید هر دو آرایش در هر گام آزمایش ثابت باقی بماند. وزن دانه ها در آرایش متراکم ۱۶۲۰ گرم و در آرایش شل ۱۵۲۴ گرم و با توجه به قطر دانه ها ($d_{50}=d=12\text{mm}$) و برای جلوگیری از ایجاد اصطکاک، ضخامت جعبه برابر ۱۳ میلی متر انتخاب می شود. بنابراین حجم جعبه برابر $1/3 \times 40 \times 30$ سانتیمتر و وزن مخصوص مجموعه دانه های پلاستیکی در آرایش متراکم و شل به ترتیب برابر $1/04$ و $0/98$ گرم بر سانتیمتر مکعب می باشد. ضمناً با استفاده از آزمایش زاویه آسایش^۳ مطابق [۱۴] مقادیر زاویه اصطکاک داخلی برای سنگریزه ها، دانه های پلاستیکی در آرایش متراکم و شل به ترتیب برابر $41/3$ ، $37/4$ و $30/7$ درجه بدست آمده است. روشن است که استفاده از دانه های پلاستیکی کروی و مجموعه سنگریزه های دارای اشکال هندسی گوناگون با ابعاد مختلف می تواند به درک بهتری از اثر شکل و اندازه ذرات مصالح دانه ای در تشکیل قوس زدگی منجر گردد.



(ب) آرایش شل



(الف) آرایش متراکم

شکل ۲ - انواع آرایش گوی های پلاستیکی

۳.۲ انجام آزمایش

ابتدا جعبه بر روی زاویه مورد نظر تنظیم می شود. دو قطعه افقی به میزان دلخواه از یکدیگر دور می گردند و در فاصله ایجاد شده یک قطعه آکاستیو فشرده مکعب مستطیلی شکل به عنوان دریچه قرار می گیرد. سپس مصالح دانه ای مطابق نظم گفته شده در بخش ۲.۲ وارد جعبه می شوند. البته باید توجه داشت نحوه وارد کردن مصالح دانه ای درون جعبه متفاوت است. برای سنگریزه ها ابتدا باید شیشه محافظ را نصب نمود و سپس مصالح را درون جعبه ریخت، اما در مورد دانه های پلاستیکی باید گفت که در ابتدا مطابق آرایش مورد نظر چیده می شوند تا جعبه کاملاً پر شود و بعد از آن شیشه محافظ نصب می گردد. سرانجام دریچه مذکور که از جنس آکاستیو است، به طرف پایین منتقل و به طور کامل برداشته می شود. توجه به این نکته ضروری است که برای عدم ایجاد تنش های برشی در مصالح باید نوع حرکت دریچه به صورت انتقالی رو به پایین باشد. با برداشته شدن دریچه مصالح دانه ای به تدریج از جعبه خارج و وارد مخزن پایینی می شوند. نکته جالب این آزمایش آن است که تمامی مصالح از جعبه خارج نمی شوند، بلکه پس از گذشت مدت زمان معینی از شروع تخلیه مصالح، ذرات محیطی طوری در کنار یکدیگر قرار می گیرند که یک قوس پایدار در روی دریچه ایجاد می شود. این قوس می تواند فشار حاصل از مصالح اطراف خود را تحمل کند و آن را به دو تکیه گاه تحتانی خود انتقال دهد. به این پدیده، اثر قوس زدگی گفته می شود. در مورد علت وقوع این پدیده در مصالح دانه ای باید گفت که حین خارج شدن مصالح از دریچه در اثر برخورد ذرات با یکدیگر، بین دانه ها اصطکاک ایجاد می شود که در نهایت سبب بسیج شدن مقاومت برشی بین ذرات و در نتیجه قفل شدگی^۴ ذرات در یکدیگر می گردد. همین قفل شدگی ناشی از اصطکاک داخلی ذرات مصالح دانه ای منجر به ایجاد قوس زدگی و تشکیل قوس پایدار در محیط دانه ای است.

در هر گام از انجام آزمایش بر روی یک زاویه معین بستر، عرض دریچه دو میلی متر نسبت به مرحله قبلی افزایش می یابد و به ازای زاویه بستر () مصالح دانه ای و عرض دریچه معین، مشخصات ظاهری قوس تشکیل شده شامل عرض و ارتفاع قوس قرائت و ثبت می شود. این روند تا آنجا ادامه می یابد که دیگر هیچ قوسی بر روی دریچه ایجاد نشود. لازم بذکر است که مطابق تعریف نویسندگان این مطالعه پژوهشی، در آستانه انهدام قوس یعنی

¹ Dense array

² Loose array

³ Angle of repose

⁴ Interlocking

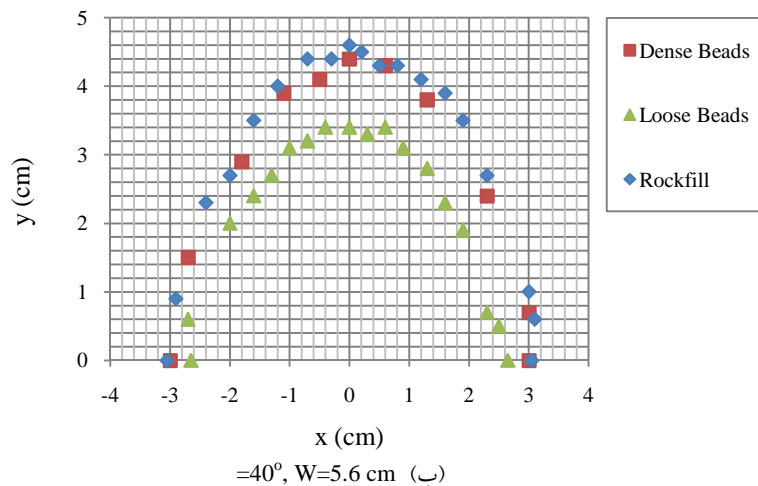
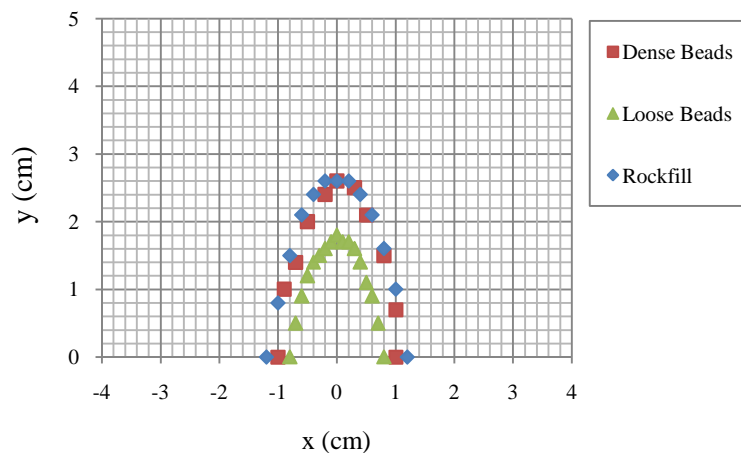
دقیقاً یک گام قبل از اینکه دیگر هیچ قوسی در مصالح دانه‌ای ایجاد نشود، به آخرین قوس پایدار تشکیل شده «قوس بحرانی» گفته می‌شود.

۳. نتایج آزمایشگاهی

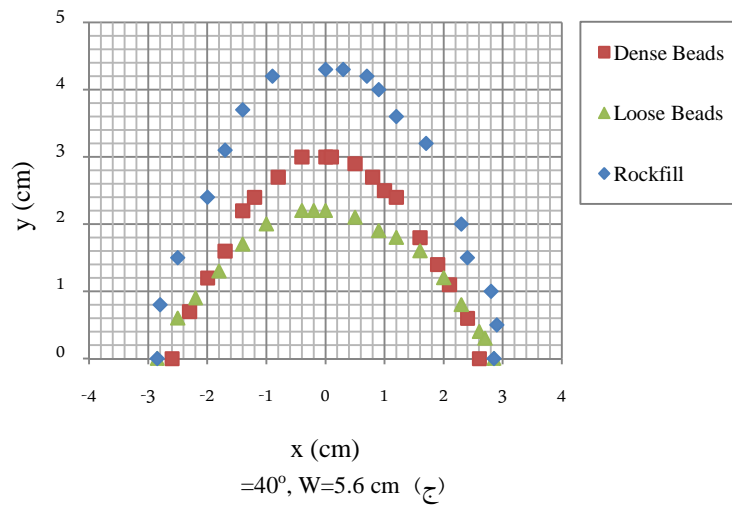
با انجام آزمایش بر روی چهار زاویه قرارگیری بستر مصالح (نسبت به افق شامل 10° ، 40° و 70° و 90° درجه مطابق توضیحات بخش ۳.۲، نتایج قابل توجهی بدست آمد. شکل ۳، نمونه‌ای از قوس زدگی در مصالح دانه‌ای و شکل ۴، مکان هندسی ذرات تشکیل دهنده قوس را به ازای عرض دریاچه به اندازه $2/8$ و $5/6$ سانتیمتر و زاویه بستر 40° و 90° درجه نشان می‌دهد. در شکل ۴ منظور از W و به ترتیب عرض دریاچه 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 ۴ می‌تواند به منظور مقایسه اثر همزمان عرض دریاچه و زاویه بستر مصالح بر روی قوس تشکیل شده به کار رود.



شکل ۳- نمونه قوس زدگی در مصالح دانه‌ای و تشکیل قوس پایدار بر روی دریاچه



شکل ۴- مقایسه شکل هندسی قوس‌های ایجاد شده بر روی دو عرض دریاچه و دو زاویه بستر

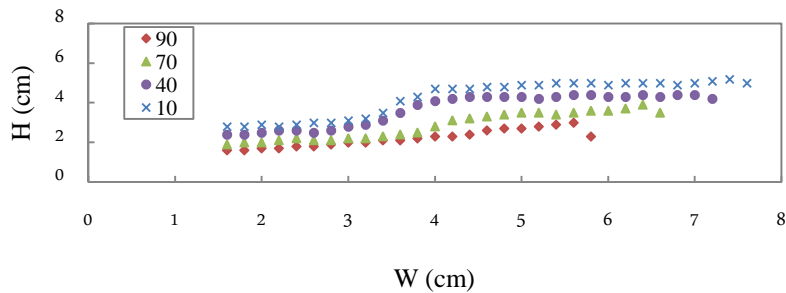


شکل ۴ - مقایسه شکل هندسی قوس‌های ایجاد شده بر روی دو عرض دریچه و دو زاویه بستر (ادامه از صفحه قبل)

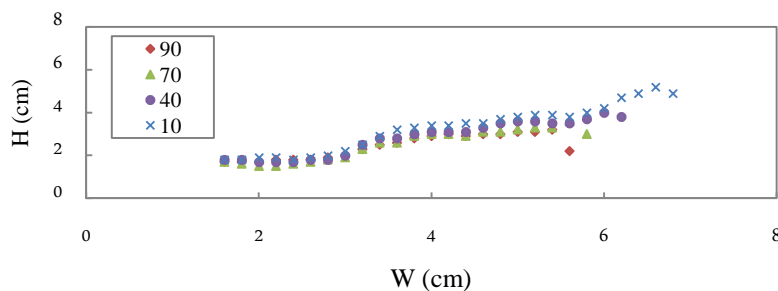
با دقت در هندسه قوس‌های تشکیل شده می‌توان با تخمین بسیار خوبی گفت که شکل هر قوس از یک سهمی به معادله زیر تبعیت می‌کند:

$$y = H \cdot [1 - (2x/B)^2] \quad (2)$$

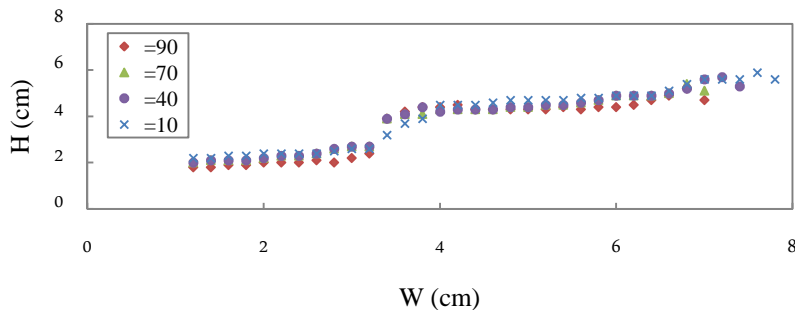
که در آن، H و B به ترتیب عرض و ارتفاع قوس و x و y نمایانگر مکان هندسی نقاط تشکیل دهنده قوس نسبت به مبدأ مختصات است. در واقع شکل ۴، اثر اندازه عرض دریچه و زاویه بستر مصالح دانه‌ای نسبت به افق را بر روی عرض و ارتفاع قوس تشکیل شده نشان می‌دهد. مطابق مشاهدات انجام شده با افزایش اندازه دریچه، عرض قوس ایجاد شده هم بیشتر خواهد شد. دلیل این امر آن است که با افزایش عرض دریچه مصالح بیشتری تخلیه می‌گردند و از آنجا که قوس روی دریچه تشکیل می‌شود، الزاماً عرض آن باید افزایش یابد. همچنین بزرگترین قوس در سنگریزه‌ها ($=41.3^\circ$) و کوچکترین قوس در دانه‌های تسییح با آرایش شل ($=30.7^\circ$) ایجاد شده است. این در حالی است که قطر دانه‌های تسییح در هر دو آرایش یکسان ($d=12\text{mm}$) است و بزرگتر از اندازه قطر متوسط سنگریزه‌ها ($d_{50}=9\text{mm}$) می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ابعاد قوس تشکیل شده دارای رابطه‌ای مستقیم با تراکم و زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای است. از طرف دیگر مطابق شکل ۵، افزایش در زاویه قرارگیری بستر مصالح نسبت به افق سبب کاهش ارتفاع قوس (H) شده است. بدیهی است با افزایش زاویه بستر مصالح نسبت به افق، مؤلفه شتاب ثقل مؤثر ($g \cdot \sin$) اعمال شده بر مصالح افزایش می‌یابد و در نتیجه فشار سربار موجود بر روی قوس ایجاد شده بیشتر می‌شود. بنابراین، به قوس تشکیل شده فشار بیشتری اعمال می‌شود و از این رو، 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 گفته شد با افزایش اندازه دریچه، ارتفاع قوس پایدار تشکیل شده افزایش می‌یابد، اما نکته قابل توجه این است که قوس بحرانی دارای بیشینه اندازه ارتفاع نمی‌باشد؛ بلکه دقیقاً در آستانه انهدام قوس، ارتفاع قوس نسبت به گام قبل اندکی کاهش می‌یابد (شکل ۵). علت این مسأله را می‌توان اینگونه بیان نمود که با توجه به افزایش عرض دریچه و در نتیجه آن افزایش عرض قوس، از یک سو 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 قوس مجبور است برای تحمل فشار وارده ارتفاع خود را کم کند (شکل ۵). البته این یافته‌ای جدید است و تفسیر دلیل اصلی بروز آن نیاز به بررسی بیشتری دارد.



(الف) دانه‌های پلاستیکی با آرایش متراکم



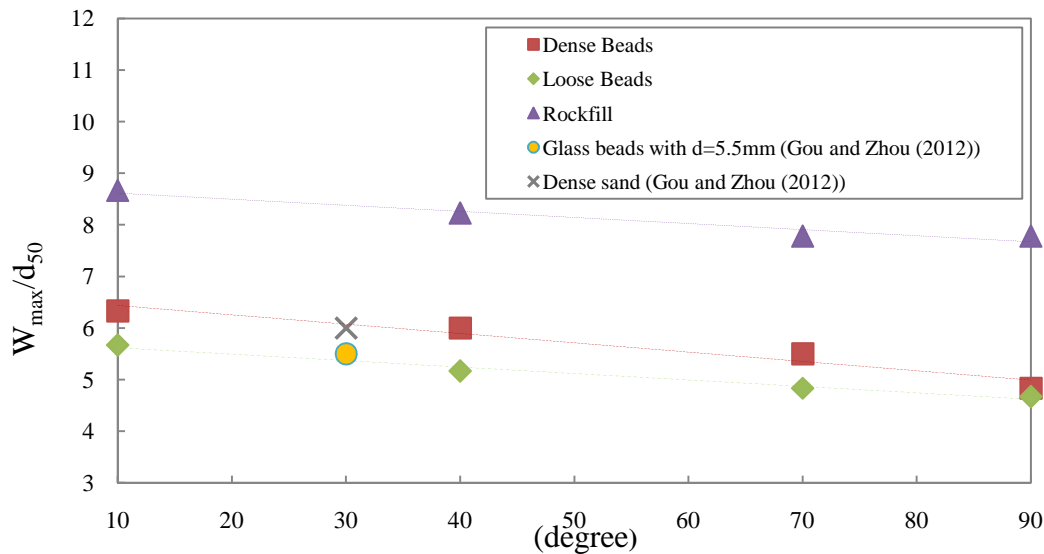
(ب) دانه‌های پلاستیکی با آرایش شل



(ج) سنگریزه‌ها

شکل ۵- تغییرات ارتفاع قوس ایجاد شده در مصالح دانه‌ای بر حسب عرض دریاچه

مطابق تعریف این مقاله حداکثر عرض دریاچه برای تشکیل قوس، عبارت است از عرضی که به ازای مقداری بزرگتر از آن، دیگر امکان شکل‌گیری هیچ قوسی وجود نخواهد داشت. بر اساس مشاهدات انجام شده، حداکثر عرض دریاچه به ازای مقادیر مختلف زاویه قرارگیری بستر مصالح متفاوت است. البته دلیل آن بیشتر مورد بررسی قرار گرفت، اما توجه به این نکته ضروری است که حداکثر عرض دریاچه با در نظر گرفتن مقدار زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای این پژوهش برای زوایای مختلف بستر به صورت نشان داده شده در شکل ۶ می‌باشد. مشاهده می‌شود که حداکثر عرض دریاچه از پنج برابر قطر متوسط دانه برای دانه‌های پلاستیکی با آرایش شل بر روی زاویه بستر به میزان ۹۰ درجه تا حدود ۸/۶ برابر قطر متوسط دانه برای مجموعه سنگریزه‌ها بر روی زاویه بستر به اندازه ۱۰ درجه متغیر است. باید دانست که نتایج مطالعه پژوهشی حاضر، کار تحقیقاتی گو و ژو [۱۳] بر روی چند نوع مصالح دانه‌ای از جمله مجموعه‌ای شامل گوی‌های شیشه‌ای با قطر متوسط ۵/۵ میلی‌متر و ماسه متراکم را هم که برای زاویه ۳۰ درجه انجام شده تأیید می‌کند. نتیجه کار آن‌ها جهت مقایسه در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ - نسبت حداکثر عرض دریچه به قطر متوسط ذره بر حسب زاویه قرارگیری بستر مصالح دانه‌ای

۴. نتیجه‌گیری

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 دریچه با قابلیت دریچه و بستر متحرک ساخته شد و به کمک آن ابعاد قوس ایجاد شده در مصالح دانه‌ای بر حسب زاویه اصطکاک داخلی، قطر متوسط و زاویه قرارگیری بستر مصالح مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهدات آزمایشگاهی نشان دادند 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. 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. ضمناً حداکثر عرض دریچه با توجه به زاویه اصطکاک داخلی و زاویه بستر مصالح حدوداً ۵ تا ۸/۶ برابر قطر متوسط ذرات محیط دانه‌ای بدست آمده است.

۵. قدردانی

از مشاوره ارزنده جناب آقای دکتر جعفر بلوری بزاز در خصوص طراحی دستگاه توسعه یافته دریچه و دیگر مراحل انجام این پژوهش آزمایشگاهی صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

۶. مراجع

1. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics: J. Wiley and Sons, inc.; 1943.
2. Jiang Y-J, Towhata I. Experimental Study of Dry Granular Flow and Impact Behavior Against a Rigid Retaining Wall. Rock Mech Rock Eng 2012;1-17.
3. Akbarzadeh H, Bayat A. Investigating ASTM F 1962 arching factor for Polyethylene pipes installed by Horizontal Directional Drilling. Tunnelling and Underground Space Technology 2012.
4. Chen CN, Huang W-Y, Tseng C-T. Stress redistribution and ground arch development during tunneling. Tunnelling and Underground Space Technology 2011;26:228-35.
5. Chen RP, Tang LJ, Ling DS, Chen YM. Face stability analysis of shallow shield tunnels in dry sandy ground using the discrete element method. Computers and Geotechnics 2011;38:187-95.
6. Chen R-p, Li J, Kong L-g, Tang L-j. Experimental study on face instability of shield tunnel in sand. Tunnelling and Underground Space Technology 2013;33:12-21.
7. Lee CJ, Wu BR, Chen HT, Chiang KH. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil. Tunnelling and Underground Space Technology 2006;21:119-32.



اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
۳۰ مهر و ۱ آبان ماه ۱۳۹۲



8. Kahyaoglu M, Imançlı G, Önal O, Kayalar A. Numerical analyses of piles subjected to lateral soil movement. *KSCE J Civ Eng* 2012;16:562-70.
9. Eekelen SJM, Bezuijen A, Lodder HJ, van Tol AF. Model experiments on piled embankments. Part II. *Geotextiles and Geomembranes* 2012;32:82-94.
10. Karinski YS, Dancygier AN, Leviathan I. An analytical model to evaluate the static soil pressure on a buried structure. *Engineering Structures* 2003;25:91-101.
11. Roberts AW. Review of mass-flow hopper design with respect to stress fields and surcharge loads. *Particuology* 2010;8:591-4.
12. Tien H-J. *A Literature Study of the Arching Effect*: Massachusetts Institute Of Technology; 1996.
13. Guo, Zhou. Arch in granular materials as a free surface problem. *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics* 2012.
14. ASTM Standard C1444-00. *Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders* ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.