ارزیابی خطر قنات‌های متروکه غرب مشهد با استفاده از نرم‌افزار پلاکسیس

فهیمه صالحی‌متعهد، ناصر حافظی‌مقدس، محمد غفوری، غلامرضا لشکری‌پور؛ دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ: دریافت ۹۱/۸/۱۵ **پذیرش** ۹۲/٤/۱۸

چکیده

مشهد در اقلیم خشک و نیمه خشک قرار گرفته است. در گذشته بخش اعظم آب مورد نیاز این شهر و اراضی کشاورزی حومه آن از طریق سیستم قنات تامین می‌شد. امروزه اغلب این رشته قنات‌ها خشک شده و به زیر پوستهٔ شهر رفته است. افزایش بلند مرتبه‌سازی و گودبرداری‌های عمیق باعث افزایش بار وارده به قنات‌های متروکه در زیر شهر شده و این امر می‌تواند سبب فرونشست زمین و تخریب سازه‌ها شود. خطر بروز این پدیده در غرب مشهد، در پژوهش حاضر بررسی شده است. برای این منظور با استفاده از عکس‌های هوایی (۱:۲۰۰۰۰ سال ۱۳٤٥) موقعیت رشته و میل قنات‌ها در نقشه پیاده شد. بر اساس خصوصیات خاک در برگیرنده مسیر قنات‌ها، پایداری مجرای قنات تحت بارهای استاتیکی با استفاده از نرم‌افزار پلاکسیس[۱] ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق کوره قنات، این تونل زیرزمینی بار بیش‌تری را تحمل خواهد کرد. به‌طوری‌که به‌ازای هر ۱/۲ متر افزایش عمق کوره قنات، تحمل قنات قبل از فروریزش ($10 kN/m^2$) معادل بار وارده از ساختمان یک طبقه افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش عمق، از تأثیر وجود کول (سیستم نگه‌دارنده کورهٔ قنات) در پایداری قنات کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مشهد، فروریزش قنات، نرم‌افزار Plaxis، زون گسیختگی

* **نویسنده مسئول** fahimehsalehi@ymail.com

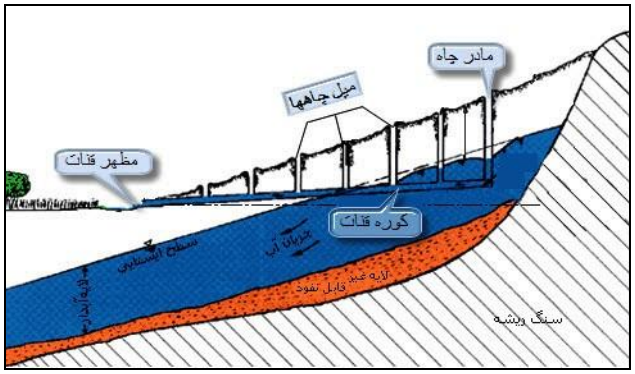
۱. Plaxis

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

مقدمه

از ۲۰۰۰ سال قبل تا حدود سه دهه قبل بخش عمدهٔ آب مصرفی کشاورزی و شرب در بسیاری از بخش‌های ایران به‌وسیله سیستم قنات تامین می‌شد. استیروز[1] (۲۰۰۶) معتقد است که قنات نقش مهمی در توسعهٔ تمدن انسانی در اقلیم‌های خشک داشته است. او در مقاله خود به بررسی چگونگی حفر قنات پرداخته است و از تکنیک ترازیابی استفاده شده برای حفر قنات به‌عنوان یک شگفتی یاد کرده است.این سیستم آب‌رسانی از تونلی تقریباً افقی با شیب بسیار کم تشکیل شده است که بخشی از این تونل زیر سطح آب زیرزمینی است و به‌کمک نیروی گراویته آب را به سطح زمین می‌رساند. به‌منظور ایجاد تهویهٔ هوا و سهولت خروج مواد حفر شده، یک سری شفت‌های عمودی در مسیر تونل حفر می‌گردد [۲] (شکل ۱).

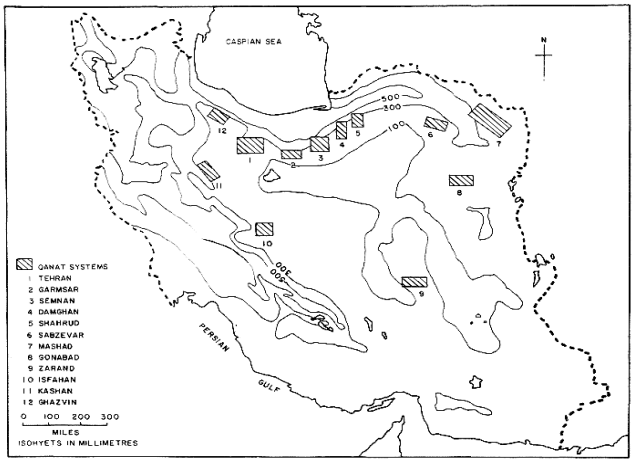


شکل ۱. مقطع طولی و بخش‌های مختلف یک قنات

امروزه در بسیاری از بخش‌های ایران چاه‌های عمیق به‌سرعت در حال جای‌گزینی با سیستم قنات هستند که نتیجه این امر افت سطح آب زیرزمینی و بی‌آب شدن این سیستم آب‌رسانی سنتی است [۲]. فروریزی قنات‌های خشک و مدفون شده در مناطق شهری، به‌عنوان خطری برای سازه‌ها و تأسیسات شهری محسوب می‌شوند [۳]. چنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود بیش‌ترین تمرکز رشته قنات‌ها در ۱۲ منطقه از کشور واقع شده است که یکی از این مناطق محدودهٔ شهر مشهد است. از لحاظ وسعت و جمعیت، مشهد دومین کلان‌شهر کشور به‌حساب می‌آید. مساحت این شهر ۳۲۰ کیلومترمربع و طبق سرشماری سال ۱۳۹۰ جمعیت آن ۲،۷۷۲۲۸۷ نفر است.

۱. Stiros

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]



شکل ۲. توسعهٔ سیستم قنات در ایران

محدودهٔ بررسی شده در این تحقیق منطقهٔ ۱۱ شهرداری مشهد است که منطقه‌ای مثلث شکل است و در غرب شهر که تمرکززیادی از قنات در آن مشاهده شده است، قرار دارد. پژوهش‌*های* متعددی در مورد سیستم قنات و نشست زمین در اثر فروریزش قنات انجام شده است. لایتفوت[۱] (۱۹۹٦)، به بررسی قنات‌های سوریه و رابطهٔ بین نشست‌های قدیمی و موقعیت این قنات‌ها پرداخته است. عطاپور و آفتابی (۲۰۰۲)، پدیدهٔ کارستی شدن و نشست زمین ناشی از آن را در محدودهٔ شهر کرمان بررسی کرده‌اند و تأثیر قنات‌ها را در تسریع تشکیل فروچاله و نشست زمین بررسی کرده‌اند. هاشمی سهی و هاشمی سهی (۱۳۸٤)، به بررسی شیوه‌های مهار کردن قنات‌های دایر و بایر و جلوگیری از ریزش آن‌ها در مناطق شهری پرداخته‌اند. رنجبر و جعفری (۱۳۸۸) به بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین دشت اشتهارد پرداختند و بیان کردند که وجود کوره‌های قنات و کاهش سطح آب زیرزمینی و وجود سازندهای تبخیری از مؤثرترین عوامل فرونشست زمین در دشت اشتهارد است. هم‌چنین رضایی و دادستان (۱۳۹۱) وجود قنات قدیمی پوشیده شده در عمق ۱۵ در شهرک طالقانی شهر اشتهارد را دلیل ایجاد نشست خطی دانستند. امینی حسینی و همکاران (۲۰۰٤) و هم‌چنین پلت[۲] و همکاران (۲۰۰۵)، به‌بررسی رفتار قنات‌ها در زمین لرزه سال ۲۰۰۳ بم پرداخته‌اند که در اثر این زمین‌لرزه تعدادی قنات تخریب شده و یا آسیب جدی دیده‌اند. ریحانی[۳] و نگار[٤]

۱. Lightfoot ۲. Pellet ۳. Rayhani ٤. El Naggar

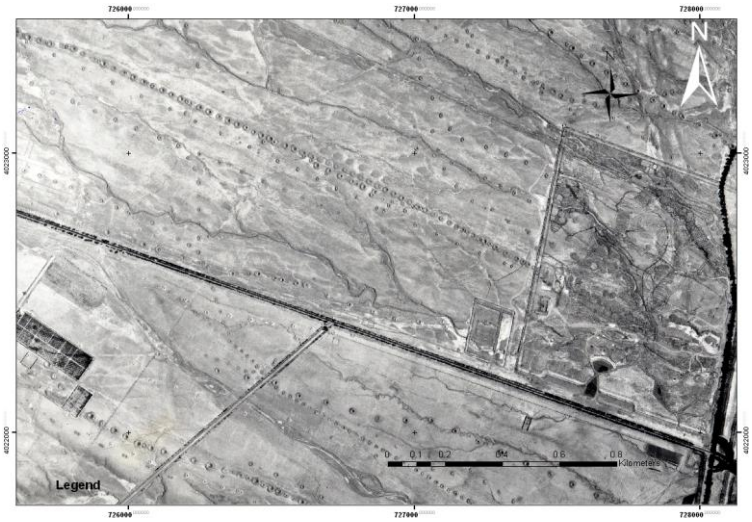
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

(۲۰۰٦)، تحلیل پایداری قنات را به‌کمک نرم‌افزار فلک[1] انجام داده‌اند و محدودهٔ شهر تهران را از منظر فروریزش قنات زون‌بندی کرده‌اند. شریعتمداری و فاضلیان (۱۳۸۱)، پایداری فضاهای زیرزمینی در مجموعه کاریز کیش را بررسی کرده و مقاطع مختلف این مجموعه قنات را به‌کمک نرم‌افزار فلیس تحلیل کرده‌اند.

روش بررسی

در پژوهش حاضر با استفاده از عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ سال ۱۳٤٥ ابتدا موقعیت میل چاه قنات‌های واقع در محدودهٔ مشهد مشخص شد و سپس از عکس‌های هوایی ۱:٦۰۰۰ شهری سال ۱۳۵۱ استفاده شد تا موقعیت قنات‌های منطقهٔ ۱۱ واقع در غرب شهر با دقت بیش‌تری تعیین شود. از جمله معیارهای استفاده شده در تشخیص قنات‌ها خاک‌ریز اطراف میل قنات است که به‌صورت منظم و رشته‌ای در عکس‌های هوایی قابل مشاهده است و در اقلیم‌های خشک که نرخ فرسایش کم‌تر است به‌راحتی قابل شناسایی است [۱۱]، [۱۳]. در شکل ۳ نمایی از چندین رشته قنات در عکس هوایی واقع در غرب مشهد نشان داده شده است.



شکل ۳. نمایی از رشته قنات‌های واقع در غرب مشهد در عکس هوایی [۱٤]

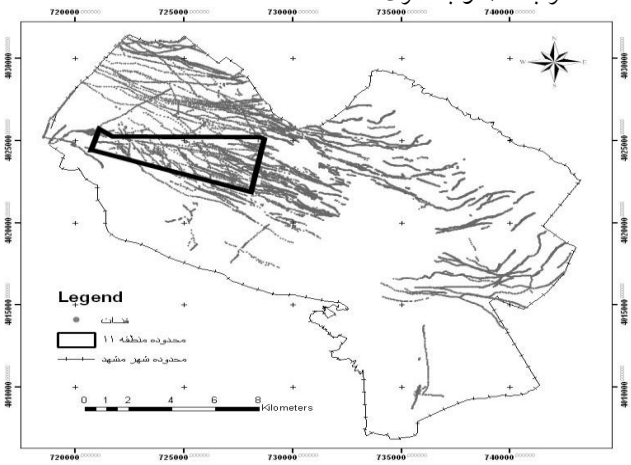
۱. FLAC

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

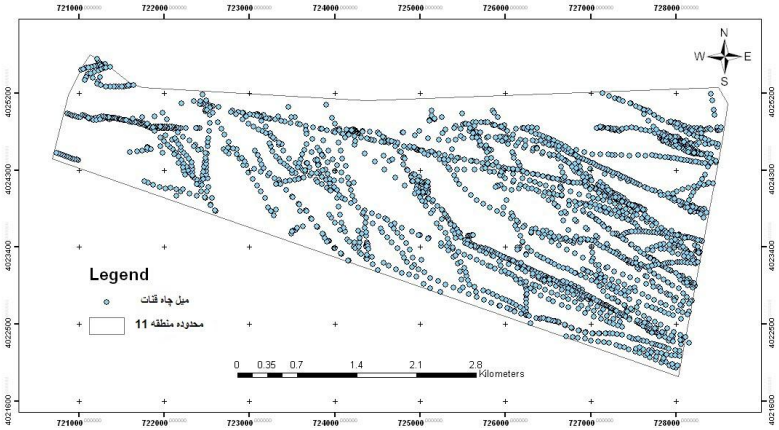
بررسی قنات‌های شهر مشهد

با توجه به محدودهٔ طرح جامع شهر مشهد تعداد رشته قنات دایر و بایر در محدودهٔ کنونی شهر ٦٣ رشته است. طویل‌ترین و عمیق‌ترین قنات واقع در محدودهٔ مشهد، قنات بحرآباد با عمق مادر چاه ۱۳۳ متر و طول ۲۲ کیلومتر است [۱۵]. مجموع طول قنات‌های واقع در محدودهٔ شهری ٤٣٠٠٠٠ متر است که با توجه به لایهٔ رقومی تهیه شده به‌کمک عکس‌های هوایی ۱۹۸۸۱ میل چاه قنات در محدودهٔ شهر وجود دارد. امروزه از کل قنات‌های واقع در محدودهٔ شهر، فقط ۲ رشته قنات قاسم‌آباد و پاچنار آب‌دارند اما در سال ۱۳٤۰، ۵۷ قنات آب‌دار در محدودهٔ امروزی شهر وجود داشته است. به‌عبارت دیگر در طول دوره‌ای تقریباً ۵۰ ساله ۹۵٪ از قنات‌های شهر مشهد خشک شده‌اند [۱۳]. شکل ٤ قنات‌های مشهد را نشان می‌دهد که با تعیین موقعیت هر میل چاه برروی عکس‌های هوایی (۱:۲۰۰۰۰ سال ۱۳٤۵) تعیین شده است. چنان‌که در شکل ٤ مشاهده می‌شود، اغلب رشته قنات‌ها در بخش‌های غربی شهر متمرکز بوده است. شکل ۵ نیز قنات‌های محدودهٔ بررسی شده در منطقهٔ ۱۱ مشهد را نشان می‌دهد. تمرکز قنات در شرق این منطقه بیش‌تر از غرب آن است و جهت‌گیری رشته قنات‌ها عمدتاً شمال غرب- جنوب شرق است.



شکل ٤. قنات‌های مشهد

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]



شکل ۵. قنات‌های منطقهٔ ۱۱ شهرداری مشهد

در این منطقه ۹ رشته قنات اصلی وجود دارد (هر رشته قنات چندین رشته فرعی نیز دارد) که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آمده است. مادر چاه اغلب قنات‌های منطقه در کوه‌پایه‌ها و خارج محدودهٔ شهری قرار گرفته است. متوسط عمق مادر چاه این قنات‌ها ۷۰ متر و میانگین طول رشته قنات ۱۰ کیلومتر است. از میان قنات‌های جدول ۱ فقط قنات قاسم‌آباد آب‌دار است. کم‌ترین عمق مجرای زیرزمینی قنات در منطقه در محل مظهر این قنات است که تونل زیرزمینی قنات به سطح زمین می‌رسد. قطر میل چاه قنات‌های منطقه اغلب در حدود ۱ متر و قطر مجاری زیرزمینی قنات در حدود ۱/۲-۱ متر است. فاصلهٔ میل چاه‌ها در منطقهٔ بررسی شده بسیار متغییر است. به‌طور میانگین فاصلهٔ میل چاه‌ها در منطقه در حدود ٤٠ متر است. با بررسی‌های انجام شده در منطقه مشخص شد که هر چه خاک درشت‌دانه‌تر باشد فاصلهٔ میل چاه‌ها بیش‌تر است. چنان‌چه میانگین فاصلهٔ میل چاه‌ها در خاک شنی ۵۰ متر است و این میانگین در خاک ماسه‌ای در حدود ۲۷ متر است.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

جدول ۱. مشخصات قنات‌های واقع در منطقهٔ ۱۱ مشهد [۱۵]

تاریخ آمار برداری	آب‌دهی (LS)	طول قنات	عمق مادر چاه (متر)	نام قنات	شماره نقشه
۱۳٤۲	٤٥/۷	۱۱۰۰۰	٦٥	آب سرده	۷۲۰-٤۰۲٥-۱Q
۱۳٤۲	٤۲	٦۱۰۰	۷۱	فرح‌آباد	۷۲۰-٤۰۲٥-٥Q
۱۳٤۲	۸	۱۸۰۰۰	۹۰	نکا	۷۲۰-٤۰۲٥-۱۱Q
۱۳٤۳	خشک	۱۳۰۰۰	۸۰	میل کاریز	۷۲۰-٤۰۲٥-٤Q
۱۳٤۰	۹/٤	۷۰۰۰	٦٥	سناباد	۷۲۰-٤۰۲٥-٤Q
۱۳٤۳	٥۲/٥۹	۱۷۰۰۰	۷٥	نخودک	۷۲٥-٤۰۲٥-۲Q
۱۳٤۳	۲۰	۲۳۰۰	٤۳	قاسم‌آباد	۷۱٥-٤۰۲٥-٥Q
۱۳٤۲	٤۰	۸٥۰۰	۸۰	ملک‌آباد	۷۲۰-٤۰۲٥-٥Q
۱۳٤۲	-	۷۰۰۰	۷۰	سعدآباد	

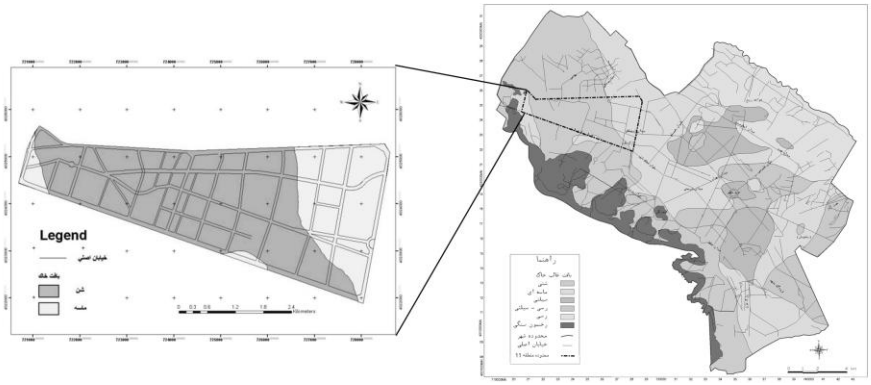
پهنه‌بندی مقدماتی خطر ریزش قنات‌ها

برای پهنه‌بندی خطر ریزش قنات‌ها از: ۱. خصوصیات زمین شامل بافت خاک و تراز آب، ۲. فراوانی و تمرکز میل قنات و عمق میل قنات و ۳. کاربری اراضی (بار وارده از سازه‌ها) استفاده شد. برای این منظور محدودهٔ بررسی شده به بلوک‌های ۱۰۰m ×۱۰۰ m تقسیم شد. سپس با استفاده از معیارهای فوق وضعیت هر شبکه از نظر خطر ریزش قنات‌ها ارزیابی شد. شکل ٦، تصویر سمت راست نقشه بافت خاک مشهد را در عمق ۱۰ متر نشان می‌دهد که محدودهٔ بررسی شده با بزرگ‌نمایی بیش‌تر در سمت چپ تصویر آورده شده است [۱٦]. چنان‌که در این شکل مشخص است بخش‌های غربی مشهد پوشیده از خاک‌های درشت‌دانه شنی و ماسه‌ای است. در این منطقه آب زیرزمینی در اعماق ٦۰ تا ۱۱۰ متری از سطح زمین قرار دارد (شکل ۷). با توجه به این‌که متوسط عمق مادر چاه قنات‌ها ۷۰ متر است و اغلب این مادر چاه‌ها خارج از محدوده بررسی شده قرار دارند؛ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که میل چاه‌های قنات‌های منطقه عمقی کم‌تر از ۷۰ متر دارند. بنا بر این سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از عمق قرارگیری مجاری قنات‌ها است و تأثیر مستقیمی در اشباع کردن دیواره قنات و ناپایداری آن نخواهد داشت [۱۳]. لازم به ذکر است با توجه به پایین بودن سطح آب زیرزمینی و یک‌سان

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

بودن تقریبی تراز آب در منطقه و هم‌چنین همگن بودن بافت خاک، این دو پارامتر در پهنه‌بندی تأثیر نداشتند.

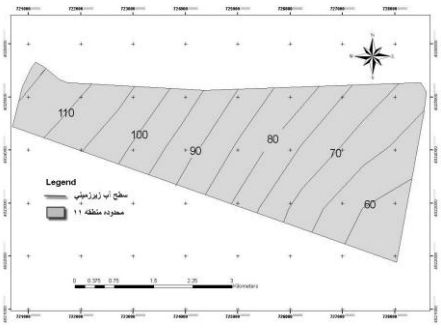


شکل ٦. نقشهٔ بافت خاک مشهد در عمق ۱۰ متر [١٦]

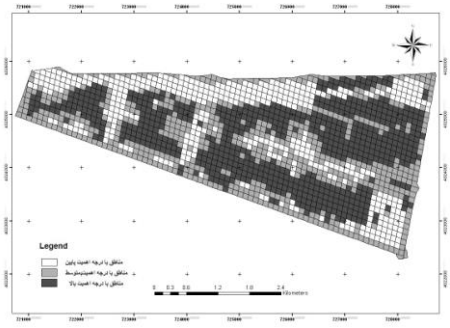
به‌منظور بررسی کاربری اراضی در محدودهٔ بررسی شده از طرح جامع ۱۳۸۵ مشهد استفاده شده است. کاربری‌های در نظر گرفته شده در این طرح شامل کاربری مسکونی، آموزشی، تجاری، بهداشتی، فضای سبز و تفریحی، دولتی و تاریخی فرهنگی است. کاربری مسکونی شامل تراکم کم (دوطبقه و کم‌تر)، تراکم متوسط (سه طبقه) و تراکم زیاد (بیش از سه طبقه) است. شکل ۸ رده‌بندی محدودهٔ بررسی شده را بر اساس کاربری اراضی در بلوک‌های به ابعاد ۱۰۰ m ×۱۰۰m نشان می‌دهد. بلوک‌های سفید رنگ کاربری تراکم پایین مسکونی و فضای سبز و تفریحی دارند و جزء مناطق با درجهٔ اهمیت کم از نظر کاربری اراضی هستند. بلوک‌های با درجه اهمیت متوسط با رنگ خاکستری مشخص است و شامل تراکم متوسط مسکونی و خیابان‌های اصلی است. سومین گروه، بلوک‌های با بیش‌ترین درجهٔ اهمیت هستند؛ که سیاه رنگ است و شامل تراکم زیاد مسکونی و هم‌چنین کاربری‌های آموزشی، تجاری، بهداشتی، دولتی و تاریخی فرهنگی است و در حدود ٤٠٪ از محدودهٔ بررسی شده را در بر می‌گیرند.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]



شکل ۷. نقشهٔ هم عمق آب زیرزمینی [۱۷]



شکل ۸. منطقه‌بندی بر اساس کاربری اراضی

در این تحقیق از عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ سال ۱۳٤۵ و ۱:٦۰۰۰ سال ۱۳۵۱ استفاده شده تا فراوانی میل چاه قنات‌ها در محدودهٔ منطقه ۱۱ شهرداری مشهد تعیین شود. همهٔ قنات‌های واقع در این منطقه به‌صورت عوارض نقطه‌ای در یک لایه اطلاعات رقومی تهیه شده است. سپس تمرکز میل چاه قنات بر اساس تعداد آن‌ها در هر شبکه ده هزار مترمربعی بررسی شده است (شکل ۹). اگر بلوک فاقد میل چاه قنات باشد، آن محدوده خطری از نظر ریزش قنات ندارد که این مناطق در شکل ۹ با رنگ سفید مشخص شده‌اند. لازم به ذکر است، با توجه به این‌که میانگین فاصلهٔ میل قنات‌ها در خاک شنی ۵۰ متر و این میانگین در خاک ماسه‌ای در حدود ۲۷ متر است؛ اگر در بلوکی با ابعاد ۱۰۰m ×۱۰۰ m میل قناتی وجود نداشته باشد به معنای این است که در زیر این بلوک قناتی وجود ندارد. در مناطقی که با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند، فراوانی میل چاه قنات بیش‌تر است و در هر بلوک بین ۳–۱ میل چاه قنات قرار دارد. محدوده‌های با بیش‌ترین فراوانی میل چاه قنات (بیش‌تر از ۳ میل چاه در هر بلوک) در شکل ۹ سیاهرنگ هستند.

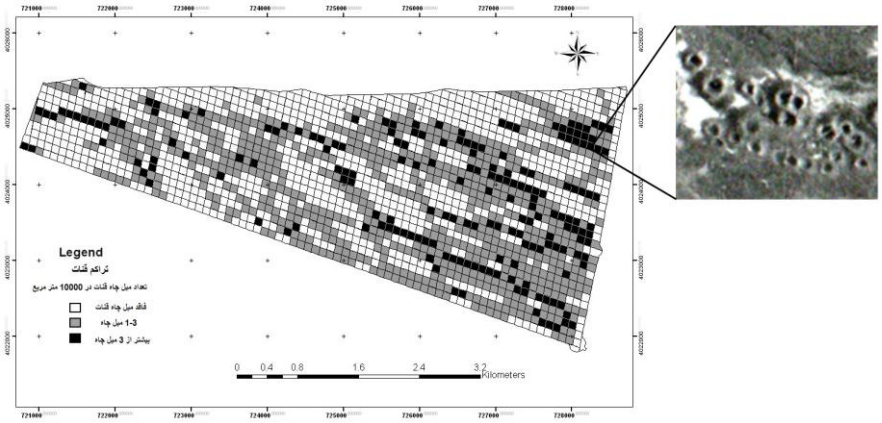
٤۷/۵٪ از بلوک‌ها فاقد میل چاه هستند. ٤۱٪ از بلوک‌ها بین ۳–۱ میل چاه دارند و ۱۱/۵٪ بلوک‌ها بیش از ۳ میل چاه دارند. با این‌که آخرین گروه فراوانی کمی دارد اما به‌طور متوسط این بلوک‌ها دارای ۱۰–۸ میل چاه قنات‌اند و در چندین مورد فقط در یک بلوک با مساحت تقریبی ده هزار مترمربع، ۲۰ میل چاه قنات واقع شده است. در بعضی موارد فاصلهٔ میل چاه‌های حفر شده کم‌تر از ۱۰ متر است. این امر در تصویر سمت راست شکل ۹ مشخص است که یکی از بلوک‌های واقع در شمال شرق محدودهٔ بررسی شده بر روی عکس هوایی با

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

بزرگ‌نمایی نشان می‌دهد. قطر میل چاه قنات‌ها غالباً در حدود ۱ متر است اما به مرور زمان دهانه میل چاه به‌صورت مخروطی ریزش پیدا کرده و می‌توان گفت قطری در حدود ۵ متر یا بیش‌تر در سطح زمین خواهد داشت. این مخروط فروریزش می‌تواند تا اعماق ۷ یا ۸ متری از سطح زمین نیز ادامه یابد.

بر اساس آمار سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی به جز یک قنات، تمامی قنات‌های این منطقه خشکند. پس از خشک شدن قنات‌ها برای تسطیح زمین و ساخت و ساز بر روی آن‌ها، از خاک موجود در خاک‌ریز میل چاه قنات برای پر کردن آن استفاده شده است. در نتیجه در محل میل قنات‌ها تراکم خاک کم‌تر از دیگر بخش‌ها است که در صورت بارگذاری ناشی از سازه‌های بلندمرتبه و به‌دلیل عدم یک‌نواختی در تراکم خاک، ایجاد نشست غیریک‌نواخت در پی این سازه‌ها محتمل است.

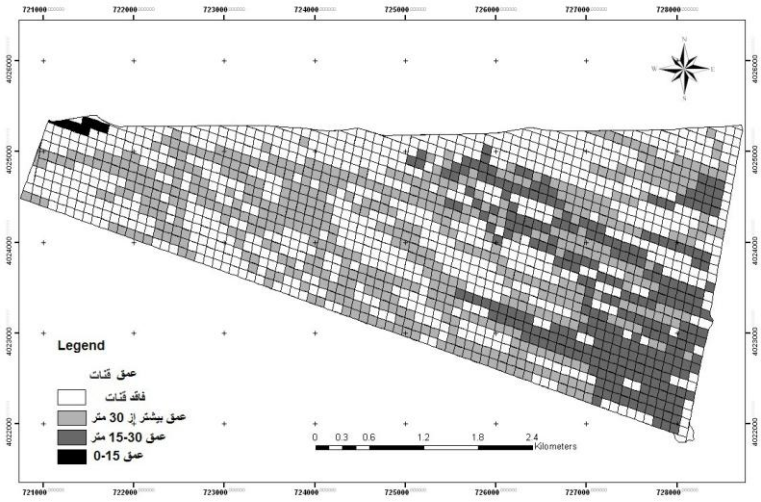


شکل ۹. سمت چپ: رده‌بندی منطقه بر اساس تعداد میل چاه قنات
سمت راست: بزرگ‌نمایی یکی از بلوک‌ها بر روی عکس هوایی

آخرین پارامتری که برای تهیهٔ نقشه پهنه‌بندی ریزش قنات‌ها بررسی شد؛ عمق قرارگیری مجرای زیرزمینی قنات است. در شکل ۱۰ عمق قرارگیری مجاری زیرزمینی قنات‌ها به‌کمک طول قنات، موقعیت مظهر قنات و عمق مادر چاه‌های قنات‌های منطقه تعیین شده است. در این شکل بلوک‌های سفید رنگ فاقد قنات‌اند. بلوک‌های خاکستری روشن قنات‌های با عمق بیش از ۳۰ متر دارند و بلوک‌های خاکستری تیره قنات‌های با عمق ۳۰-۱۵ متر را دارند.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

بلوک‌های سیاه‌رنگ واقع در شمال‌غرب منطقه مربوط به قنات آب‌دار و سطحی قاسم‌آباد است که عمقی کم‌تر از ۱۵ متر دارند (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. رده‌بندی بر اساس عمق قنات

در نقشهٔ مقدماتی پهنه‌بندی خطر، هر بلوک مطابق جدول ۲ در یکی از رده‌های I تا VI قرار می‌گیرد.

جدول ۲. پارامترهای مؤثر در نقشهٔ پهنه‌بندی خطر

کاربری اراضی / تعداد میل قنات در هر بلوک	درجهٔ اهمیت کم از نظر کاربری اراضی	درجهٔ اهمیت متوسط از نظر کاربری اراضی	درجهٔ اهمیت زیاداز نظر کاربری اراضی
فاقد میل قنات	I	I	I
۱-۳ میل قنات	II	IV	V
بیش از ۳ میل قنات	III	V	VI

رده I: بلوک فاقد میل قنات.

رده II: بلوک دارای ۳-۱ میل قنات + بلوک با درجه اهمیت کم.

رده III: بلوک دارای بیش از ۳ میل قنات + بلوک با درجه اهمیت کم.

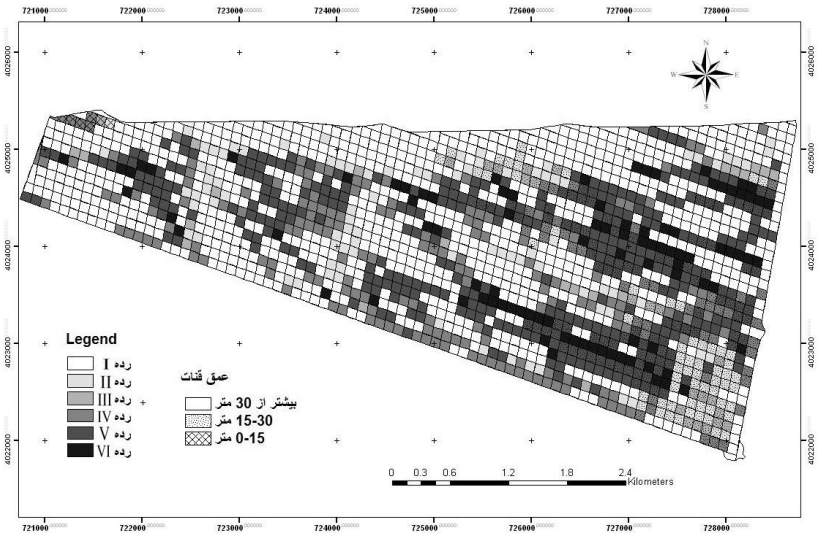
رده IV: بلوک دارای ۳-۱ میل قنات + بلوک با درجهٔ اهمیت متوسط.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

رده V: بلوک دارای ۳-۱ میل قنات + بلوک با درجهٔ اهمیت زیاد یا بلوک دارای بیش از ۳ میل قنات+ بلوک با درجهٔ اهمیت متوسط.

رده VI: بلوک دارای بیش از ۳ میل قنات + بلوک با درجهٔ اهمیت زیاد.

بلوک‌های ردهٔ I به‌دلیل این‌که فاقد میل چاه قنات هستند، خطری از نظر ریزش قنات ندارند. خطر ریزش قنات به‌ترتیب از رده I تا VI افزایش می‌یابد. بلوک‌های رده VI، جزء بلوک‌های پرخطرند که هم تمرکز بالایی از قنات دارند و هم ریسک بالایی با توجه به‌کاربری اراضی دارند. کاربری زمین در این بلوک‌ها شامل کاربری‌های با تراکم بالا مسکونی و یا کاربری‌های آموزشی، تجاری، بهداشتی، دولتی و تاریخی فرهنگی است که تراکم زیاد جمعیت در آن‌ها وجود دارد. شرایط عمقی قنات‌ها به‌صورت جداگانه در نقشهٔ پهنه‌بندی بررسی شده است. چنان‌که در نقشهٔ پهنه‌بندی (شکل ۱۱) مشاهده می‌شود، نیمی از مناطق پرخطر از نظر ریزش قنات (بلوک‌های رده VI) دارای قنات‌هایی با عمق متوسط هستند و احتمال فروریزش قنات در این بلوک‌ها نسبت به بلوک‌های با قنات‌های عمیق بیش‌تر است.



شکل ۱۱. پهنه‌بندی منطقهٔ ۱۱ مشهد بر اساس خطر ریزش قنات

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

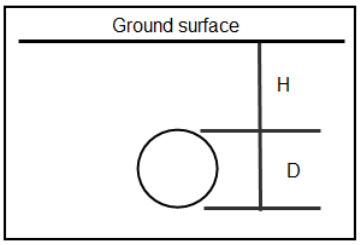
تحلیل پایداری کورهٔ قنات

در این بخش مدل‌سازی از بار وارده به کورهٔ قنات صورت گرفته و پایداری آن در شرایط مختلف بارگذاری بررسی شده است. اگر چه عمق قرارگیری کوره قنات در محدودهٔ بررسی شده پس از ۱۵ متر است؛ اما با توجه به عمق گودبرداری برای پروژه‌های بزرگ بعضاً کف پی در فاصلهٔ اندکی از کوره قنات واقع می‌شود و خطر ریزش قنات وجود دارد.

پک[۱] اولین رابطهٔ ریاضی در مورد توزیع نشست سطح زمین در اثر حفر تونل خاکی مشابه با قنات را در سال ۱۹۶۹ ارائه کرد که در آن چگونگی توزیع نشست سطح زمین نسبت به مقدار بیشینهٔ آن بررسی شده است و پایه و اساس بسیاری از محاسبات و مدل‌سازی‌های عددی برای آنالیز تغییر شکل خاک در اطراف تونل است. هم‌چنین وی بیان کرد که رابطهٔ بین عمق تونل و نشست سطحی خاک در اثر حفر تونل معکوس است و هر چه عمق تونل بیش‌تر باشد نشست سطحی کم‌تر خواهد بود. با در نظر گرفتن مجرای قنات مشابه تونلی افقی، با افزایش بار عمودی تغییر شکل پلاستیک در اطراف تونل افزایش می‌یابد تا نهایتاً به حالت بحرانی و گسیختگی برسد. یو[۲] (۲۰۰۰) با بررسی مدل‌های رفتاری خاک و سنگ در اطراف فضاهای زیرزمینی رابطه زیر را بین شعاع زون پلاستیک بحرانی و خصوصیات خاک و تونل ارائه کرد.

$$c = xH + D/۲$$

در این رابطه H ارتفاع سربار و D قطر تونل است. اگر در اثر بارگذاری، توسعهٔ نقاط پلاستیک در محیط خاک اطراف تونل به‌حدی برسد که تونل فرو بریزد در آن صورت شعاع زون پلاستیک با علامت c مشخص می‌شود که شعاع زون پلاستیک بحرانی است. برای خاک اصطکاکی مقدار x، ۰/۳۷۵ است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. عمق و شعاع تونل برای محاسبهٔ شعاع بحرانی زون پلاستیک [۱۸]

۱. Peck ۲. Yu

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

معرفی مدل

یکی از کاربردهای مدل‌های عددی آنالیز تغییر شکل خاک در اطراف تونل است [۱۹]. برای تحلیل پایداری قنات در این منطقه از روش اجزای محدود به‌صورت دوبعدی و شرایط کرنش صفحه‌ای که منجر به ساده شدن محاسبات می‌شود به‌کمک نرم‌افزار پلاکسیس V۸/۲ استفاده شده است. بدین منظور مشخصات خاک یک گمانه واقع در مرکز محدودهٔ بررسی شده در نظر گرفته شده است و قنات در اعماق ۵، ۷، ۹ و ۱۱ متری از سطح زمین قرار داده شده است. فروریزش قنات با توجه به نوع سیستم نگه‌دارنده (فاقد پوشش، پوشش آجری و یا بتنی) و میزان بارگذاری مورد تحلیل واقع شده است. در ساخت شبکه برای مدل‌سازی محیط خاک از المان‌های مثلثی ۱۵ گرهی استفاده شده است که المان بسیار دقیقی است و نتایج بهتری را برای محاسبات فروریختگی خاک ارائه می‌دهد [۲۰]. بارگذاری به‌صورت بار گسترده خطی به‌طول ۱۰ متر و بار (kN/m^2) ۱۰ به‌ازای هر طبقه ساختمان در نظر گرفته شده است. در این بررسی بارگذاری دینامیکی ناشی از زلزله و ترافیک درنظر گرفته نشده است. شرایط مرزی در کناره‌های محیط به‌صورت تغییر شکل‌های محدود در جهت افقی و آزاد در جهت قائم، و تغییر شکل‌های محدود؛ هم در جهت افقی و هم در جهت قائم، در مرز پایینی تعریف، و به‌منظور جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی بر رفتار قنات، مرزهای کناری محدودهٔ بررسی شده، از هر طرف به فاصلهٔ ۳۰ متر از محور قنات تعریف شده‌است. هم‌چنین خاک تا عمق ۲۵ متر (در حدود دو برابر بیش‌ترین عمق در نظر گرفته شده برای قنات) مدل شده است.

پارامترهای ژئوتکنیکی خاک

گمانهٔ بررسی شده که به‌منظور پژوهش‌های مکانیک خاک ساختمان اداری شهرداری منطقه ۱۱ مشهد حفر شده است؛ در بلوار دانشجو، دانشجو ۳۱ واقع شده و آزمایش‌های دانه‌بندی، برش مستقیم، SPT و نفوذپذیری بر روی خاک این گمانه انجام شده است. مدل رفتاری خاک مدل مور–کلمب است. در حالت کلی این مدل برای تخمین تقریب اولیه‌ای از رفتار خاک مناسب است و در واقع بسط قانون اصطکاک کلمب، برای حالات عمومی تنش است [۲۱].

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

پارامترهای ژئوتکنیکی به‌کار رفته در این مدل در جدول ۳ آورده شده است. به‌دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی محیط خشک در نظر گرفته شده است. یکی از پارامترهای ژئوتکنیکی برای مدل کردن خاک مدول یانگ است که با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم و به‌کمک این رابطه محاسبه شده است:

$$E=۲(۱+\nu)G$$

در این رابطه E مدول الاستیسته و ν ضریب پواسون و G مدول برشی است. در نرم‌افزار به‌صورت پیش فرض فشار مرجع P^{ref}=۱۰۰kpa استفاده می‌شود. مقدار زاویهٔ اتساع نیز از این رابطه به‌دست آمده است [۲۱]:

$$\psi = \varphi - 30$$

جدول ۳. مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک

شمارهٔ لایه	عمق (m)	طبقه‌بندی	γ_m kN/m^3	γ_{sat} kN/m^3	E_{50}^{ref} kN/m^2	C kN/m^2	φ (درجه)	ψ (درجه)	رطوبت (٪)
۱	۰-۳	**GW,GC,GM**	۲۰/۳	۲۱/۹۵	۸۵۰۰	۹	٤۱/٦	۱۱/٦	¼
۲	۳-۵	**SP,SM**	۱۹/۲	۲۱/۲۷	۷۵۰۰	۹	۳۹/۱	۹/۱	۳/۹
۳	۵-۹	**GW,GC,GM**	۲۰/۳	۲۱/۹۵	۸۵۰۰	۹	٤۱/٦	۱۱/٦	٤/۱
٤	۹(	**SW,SC,SM**	۱۹/۷	۲۱/٤	٥٤٥۰	۱٤	۳۷/۳	۷/۳	٥/٤

مشخصات سیستم نگه‌دارنده قنات

در گذشته برای حفاظت از مجرای قنات و جلوگیری از هدر رفتن آب قنات از تنبوشه‌های بیضی شکل سفالی که به آن کول می‌گویند استفاده شده است. در دهه‌های اخیر کول‌های سیمانی به‌جای کول‌های سفالی استفاده شده است. هم‌چنین بعضی اوقات به‌جای تنبوشه از آجر نیز استفاده می‌کردند [۲۲]. ضخامت کول‌های سفالی دایره‌ای شکل ٤ تا ٥ سانتی‌متر و ضخامت کول‌های سیمانی دایره‌ای شکل ٤/٥ سانتی‌متر است [۲۳].

نوع تونل در نظر گرفته شده برای مجرای زیرزمینی قنات، دایره‌ای با قطر ۱/۲ متر و دارای پوستهٔ آجری یا بتنی است و رفتار پوسته الاستیک در نظر گرفته شده است. از جمله پارامترهای مورد نیاز برای مدل کردن پوشش تونل، سختی محوری EA و صلبیت خمشی EI

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

است. برای مدل کردن پوشش آجری از مشخصات آجر معمولی استفاده شده است. مقاومت فشاری آجر معمولی ($kN/m^۲$)۶۰۰۰ است و با استفاده از رابطهٔ زیر مدول الاستیسیته آجر محاسبه شده است. که E_m مدول الاستیسیته آجر و f_m مقاومت فشاری آجر است [۲٤].

$$Em=۷۵۰fm$$

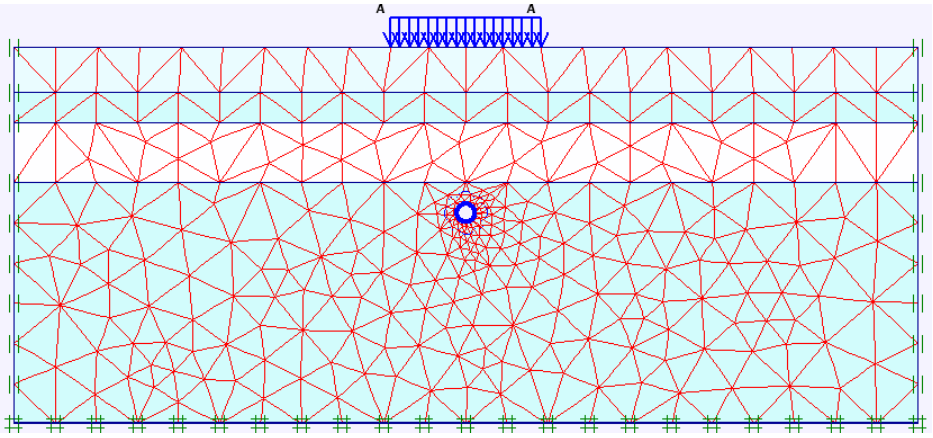
بتنی با مقاومت فشاری متوسط ($kN/m^۲$)۲۰۰۰۰ =f_c برای پوشش بتنی در نظر گرفته شده است و با استفاده از رابطهٔ زیر مدول الاستیسیته بتن محاسبه شده است [۲۵].

$$E_c = ٤۷۰۰\sqrt{f_c}$$

جدول ٤ پارامترهای مورد نیاز برای مدل کردن پوشش قنات و شکل ۱۳ مدل مش‌بندی شده را نشان می‌دهد. این مدل شامل لایه‌های چهار گانه خاک، تونل و بارگذاری است.

جدول ٤. مشخصات سیستم نگه‌دارنده قنات

نوع پوشش	EA سختی محوری kN/m	EI صلبیت خمشی kNm^2/m	ضخامت m	ضریب پواسون	وزن kN/m/m
آجری	۲۲۵۰۰۰	٤٦/۸	۰/۰۵	۰/۲۲	۰/۸۵
بتنی	۱۰۵۰۹۵۰	۲۱۸/۵۹	۰/۰۵	۰/۱۵	۱/۱۵



شکل ۱۳. مدل مش‌بندی شده قنات در عمق ۱۱ متر

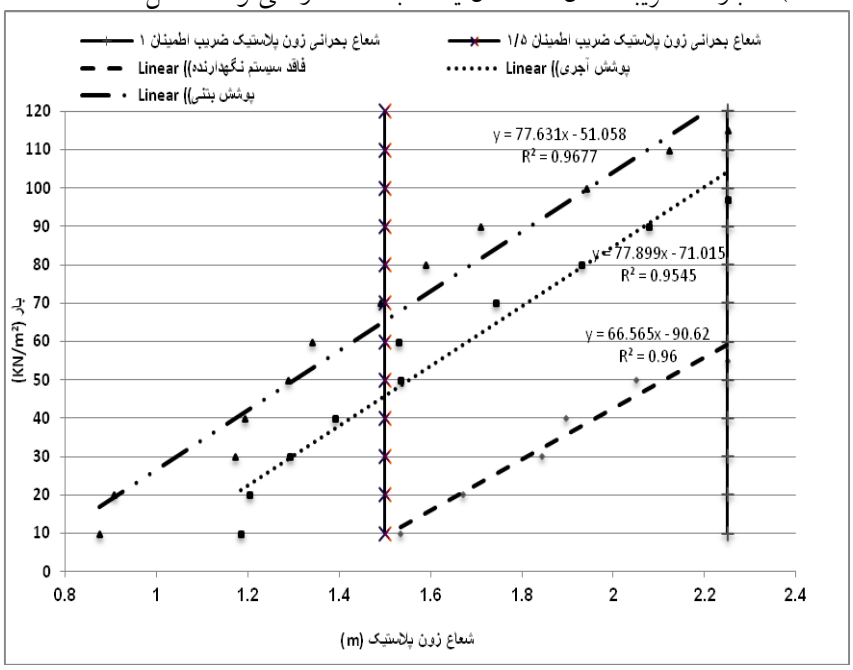
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

بررسی نتایج تحلیل

بعد از ایجاد مدل المان محدود، محاسبات در چهار مرحله و با آنالیز پلاستیک انجام شده است. مرحلهٔ اول شامل لایه‌های خاک است که این مرحله از مدل‌سازی برای ایجاد حالت تعادل اولیه است. در مرحلهٔ دوم تونل زیرزمینی قنات ایجاد می‌شود و در مرحلهٔ سوم پوشش تونل ایجاد می‌شود. مرحلهٔ آخر نیز مربوط به بارگذاری است. زمانی که قنات بدون سیستم نگه‌دارنده مد نظر باشد مرحلهٔ سوم حذف می‌شود و محاسبات در سه فاز انجام می‌پذیرد.

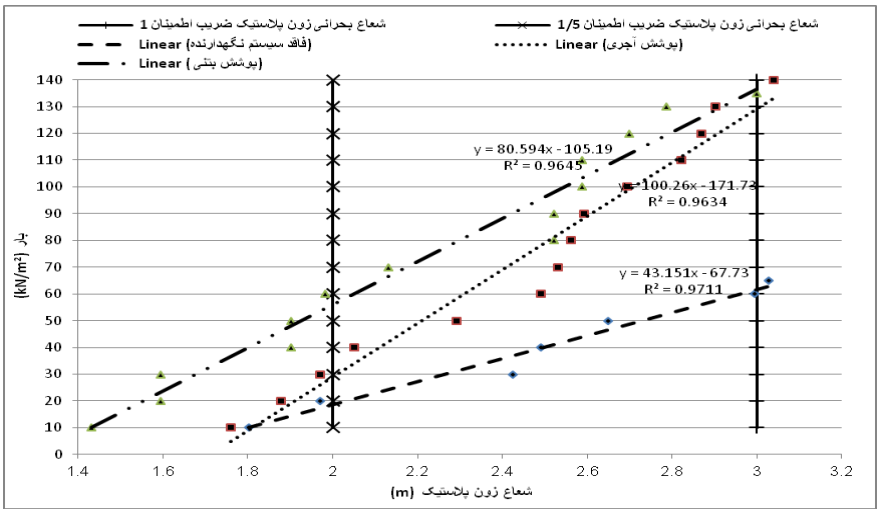
به‌منظور بررسی فروریزش قنات در اثر بارگذاری سازه‌های فوقانی، گسترش زون پلاستیک در اطراف تونل زیرزمینی قنات بررسی شده است. شکل‌های ١٤ و ١٥ و ١٦ و ١٧ گسترش زون پلاستیک از محور قنات را در عمق ٥ و ٧ و ٩ و ١١ متری درسه حالت بدون پوشش، دارای پوشش آجری یا بتنی بررسی کرده است. شکل ١٤ نشان می‌دهد که با فرض ضریب اطمینان ١/٥ (برای شعاع بحرانی زون پلاستیک) قنات بدون پوشش در عمق ٥ متر، در حدود ١٠ (kN/m^2) بار که تقریباً معادل ساختمان یک طبقه است را می‌تواند تحمل کند.



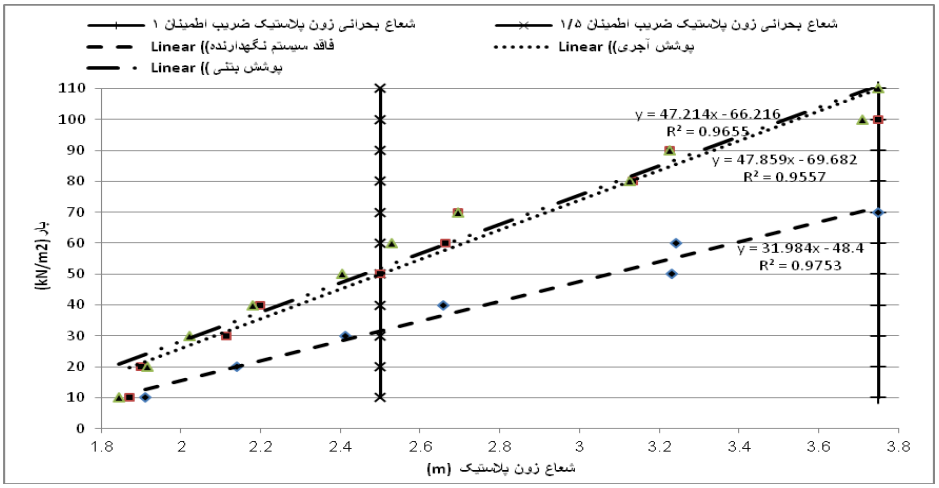
شکل ١٤. گسترش زون پلاستیک قنات در عمق ٥ متر

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]



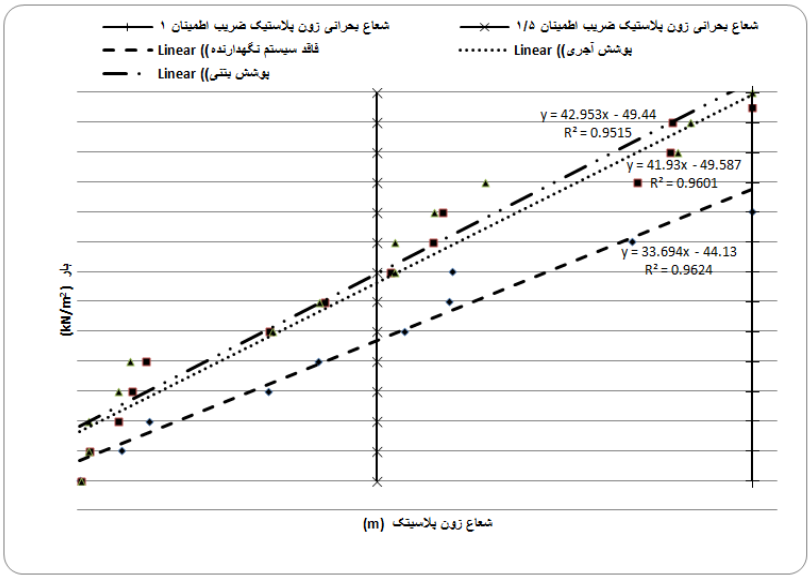
شکل ۱۵. گسترش زون پلاستیک قنات در عمق ۷ متر



شکل ۱٦. گسترش زون پلاستیک قنات در عمق ۹ متر

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]



شکل ۱۷. گسترش زون پلاستیک قنات در عمق ۱۱ متر

در صورتی‌که اگر همین قنات دارای پوشش آجری باشد بار معادل ساختمان ٤ طبقه و اگر پوشش بتنی داشته باشد بار ناشی از ساختمان ٦ طبقه را تحمل خواهد کرد. چنان‌که شکل ۱۷ نشان می‌دهد با فرض ضریب اطمینان ۱/۵، قنات در عمق ۱۱ متر اگر فاقد سیستم نگه‌دارنده باشد؛ بار معادل ساختمان ۵ طبقه را تحمل می‌کند. در صورت وجود پوشش آجری بار معادل ساختمان ۷ طبقه و اگر پوشش بتنی باشد بار معادل ساختمان ۸ طبقه را تحمل خواهد کرد (شکل ۱۷). مقایسه شکل‌های ١٤ و ۱۵ و ١٦ و ۱۷ نشان می‌دهد که اختلاف میان بیش‌ترین بار قابل تحمل توسط قنات در شرایط دارای پوشش و بدون پوشش، با افزایش عمق قنات کاهش می‌یابد. به‌عنوان نمونه قنات در عمق ۵ متر اگر دارای پوشش آجری باشد بیش از ٤ برابر و اگر دارای پوشش بتنی باشد بیش از ٦ برابر قنات فاقد پوشش بار تحمل خواهد کرد. در صورتی‌که قنات در عمق ۱۱ متر با پوشش آجری ۱/۳ برابر و با پوشش بتنی ۱/٤ برابر قنات فاقد پوشش بار تحمل می‌کند. بنا بر این با افزایش عمق قنات، تأثیر وجود سیستم نگه‌دارنده و نوع آن در تحمل بار توسط قنات کاهش می‌یابد که این امر به‌دلیل افزایش فشار همه جانبهٔ خاک و کاهش اثر بار وارده در سطح به سقف قنات با افزایش عمق است.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

با توجه به شکل‌*های* ۱٤ و ۱۵ و ۱٦ و ۱۷ وابستگی خطی میان شعاع زون پلاستیک و میزان بار وارده با ضریب هم‌بستگی (R^2) بالا برقرار است. مقدار ضریب هم‌بستگی بین ۰/۹۷۵ تا ۰/۹۵۱ است. گسترش زون پلاستیک در خاک اطراف قنات و بار ناشی از سازه‌های فوقانی دو کمیت مستقل از هم نیستند و با یک‌دیگر ارتباط دارند. تابعی که این دو کمیت را به یک‌دیگر ارتباط می‌دهد، یک تابع خطی با این فرمول عمومی است:

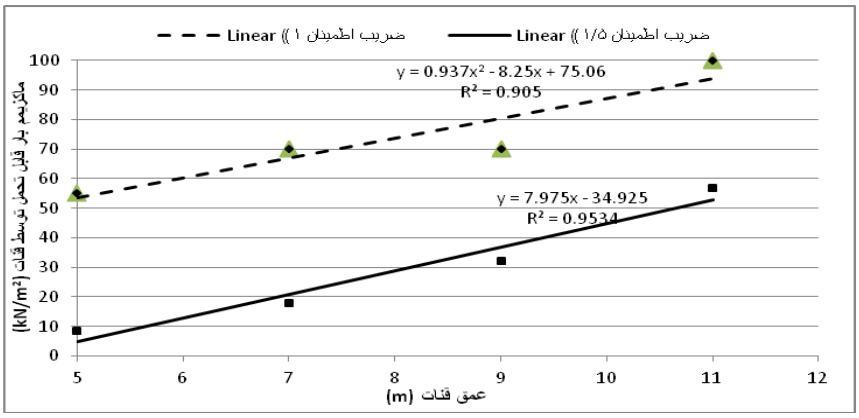
$$y = mx + b$$

که m شیب خط است و مقدار آن برای قنات فاقد سیستم نگه‌دارنده در عمق‌های مختلف بین ۳۲-٦٦/۵ متغیر است. ضریب m در قنات دارای پوشش آجری در محدودهٔ ۱۰۰-٤۲ و در قنات با پوشش بتنی در محدوده ۸۰/٦-٤۲ است. با افزایش عمق قنات شیب خط هم در قنات فاقد پوشش و هم در قنات دارای پوشش کاهش می‌یابد. کاهش شیب خط با افزایش عمق نشان‌دهندهٔ این مطلب است که با افزایش عمق، نرخ گسترش زون پلاستیک در ازای افزایش بار کاهش می‌یابد.

به‌دلیل این‌که قنات‌های منطقه قدمت زیادی دارند و اغلب این قنات‌ها در حدود ٤۰ سال قبل خشک شده‌اند و هیچ‌گونه ترمیم بعد از خشک شدن برای قنات صورت نگرفته است؛ احتمال این‌که کول قنات‌ها آسیب دیده و یا شکسته باشد زیاد است. در این صورت قنات با کول شکسته همانند قنات بدون کول عمل خواهد کرد. به‌همین دلیل رابطهٔ بین عمق قنات و بیش‌ترین بار قابل تحمل توسط قنات فاقد پوشش بررسی شده است که نتایج آن در شکل ۱۸ ارائه شده است. البته در محاسبه‌*های* حاضر فرض بر این است که با توجه به چسبندگی و خصوصیات مقاومتی خاک منطقه، قنات بدون کول و یا با کول شکسته تحت شرایط طبیعی پایدار است و تنها اثر بار خارجی بر روی آن بررسی می‌شود.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]



شکل ۱۸. رابطه عمق قنات و حداکثر بار قابل تحمل توسط قنات فاقد پوشش

چنان‌که شکل ۱۸ نشان می‌دهد؛ رابطهٔ بین عمق و حداکثر بار قابل تحمل توسط قنات خطی است و با اعمال ضریب اطمینان ۱/۵ ضریب هم‌بستگی ۰/۹۵۳ خواهد بود. بنا بر این در شرایطی که قنات فاقد پوشش است و یا پوشش قنات دچار آسیب شده است؛ با افزایش عمق قنات میزان بار قابل تحمل توسط قنات افزایش می‌یابد. با توجه به‌رابطهٔ y=۷/۹۷۵x–۳٤/۹۲ به‌ازای افزایش هر متر به عمق قنات حداکثر بار قابل تحمل توسط قنات در حدود (kN/m۲) ۸/۱ افزایش می‌یابد. در نتیجه به‌ازای افزایش هر ۱/۲ متر به عمق قنات به‌طور تقریب معادل بار ساختمان یک طبقه تحمل قنات بیش‌تر خواهد شد. این نتایج با فرض این‌که بارگذاری در سطح زمین اعمال شده و سازه‌ها دارای پی سطحی هستند به‌دست آمده است. اگر ساختمان دارای طبقات منفی و یا پی عمیق باشد، فاصلهٔ میان سطحی که بار به آن اعمال می‌شود و محور قنات کاهش می‌یابد و به‌طبع آن، حداکثر بار قابل تحمل توسط قنات نیز کاسته خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در محدودهٔ منطقه ۱۱ شهرداری مشهد واقع در غرب شهر، ۹ رشته قنات اصلی به‌کمک عکس‌های هوایی شناسایی شد. سپس بر اساس خصوصیات زمین شامل بافت خاک و تراز آب، فراوانی و تمرکز میل قنات، عمق میل قنات و کاربری اراضی (بار وارده از سازه‌ها)، این منطقه از نظر فروریزش قنات پهنه‌بندی شد و هم‌چنین با استفاده از نرم‌افزار پلاکسیس پایداری مجرای قنات تحت بارهای مختلف و عمق‌های مختلف در شرایط خاک درشت‌دانه

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

تحلیل شد. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که شیب خط در رابطهٔ خطی میان شعاع زون پلاستیک و بارگذاری با افزایش عمق قنات کاهش می‌یابد. بنا بر این با افزایش عمق قنات، نرخ گسترش زون پلاستیک در ازای افزایش بار کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش عمق قنات به‌دلیل افزایش فشار همه جانبه خاک و کاهش اثر بار وارده در سطح به سقف قنات، تفاوت میان قنات دارای پوشش و بدون پوشش در تحمل بار کم‌تر می‌شود و اثر پوشش نگه‌دارنده در پایداری قنات کاهش می‌یابد. هم‌چنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با اعمال ضریب اطمینان ۱/۵ قنات بدون پوشش در عمق ۵ متر، بار ساختمان یک طبقه را تحمل خواهد کرد در صورتی که در اعماق بیش‌تر به‌طور تقریب به‌ازای هر ۱/۲ متر افزایش عمق، قنات می‌تواند ۱۰($kN/m^۲$) معادل بار ساختمان یک طبقه بیش‌تر تحمل کند و پایدار بماند. میل چاه قنات‌ها نیز به‌صورت نقطه‌ای به‌دلیل کاهش تراکم خاک در محل میل چاه، تهدیدی برای پایداری همه سازه‌های بلند و کوتاه محسوب می‌شود.

منابع

1. Stiros S. C., "Accurate Measurements with Primitive Instruments: the ‘‘Paradox’’ in the Qanat Design" Journal of Archaeological Science, Vol. 33 (2006) 1058-1064.
2. Beaumont P., "Qanat Systems in Iran" International Association of Scientific Hydrology, Vol. 16 (2009) 39-50.
3. Hajian A. R., Ardestani E. V., Lucas C., Saghaiannejad S. M,, "Detection of subsurface Qanats by Artificial Neural Network via Microgravity data", Journal of the Earth & Space Physics. Vol. 35, No. 1 (2009) 9-15.
4. Lightfoot D. R., "Syrian Qanat Romani: History, Ecology, Abandonment" Journal of Arid Environments, Vol. 33 (1996) 321-336.
5. Atapour H., Aftabi A., "Geomorphological, Geochemical and Geoenvironmental Aspects of Karstification in the Urban Areas of Kerman City, Southeastern, Iran" Environmental Geology, Vol.42 (2002) 783-792.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

٦. هاشمی سهی ح.، هاشمی سهی م.، *قنات نشست خاک و مشکلات ساختمان‌سازی*، کنفرانس بین‌المللی قنات کرمان ، (١٣٨٤) ٧٠١-٧٠٧.

٧. رنجبر م.، جعفری ن.، *بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین دشت اشتهارد*، نشریهٔ علمی پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، شمارهٔ ١٨ و ١٩ (١٣٨٨).

٨. رضایی ف.، دادستان ا.، *بررسی علل نشست تدریجی خطی زمین و ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی در شهرک طالقانی اشتهارد*، فصلنامهٔ علوم زمین، سال ٢١، شمارهٔ ٨٣ (١٣٩١).

9. Amini Hosseini K., Mahdavifar M. R., Keshavarz Bakhshayesh M., Rakhshandeh M., "Engineering Geology and Geotechnical Aspects of Bam Earthquake" (Preliminary Report) International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (2004).

10. http://www.emsc-csem.org/Doc/BAM_IRAN/bam_report_english

11. Pellet F., Amini Hosseini K., Jafari M. K., Zohra Zerfa F., Mahdavifar M. R., Keshavarz Bakhshayesh M., "Geotechnical performance of Qanats during the 2003 Bam, Iran, earthquake" Earthquake Spectra, Vol. 21 (2005) 137-164.

12. Rayhani M. H. T., El Naggar M. H., "Collapse hazard zonation of Qanats in Greater Tehran Area", Journal of Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 25 (2006) 327-338.

١٣. شریعتمداری ن.، فاضلیان ا. ف.، *بررسی پایداری فضاهای زیرزمینی در طرح کاریز کیش*، سومین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران (١٣٨١).

١٤. صالحی متعهد ف.، *ارزیابی خطر فروریزش قنوات متروکه منطقهٔ ١١ شهرداری مشهد*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد (١٣٨٩).

١٥. سازمان جغرافیایی ارتش، عکس هوایی ١:٢٠٠٠٠، بلوک ٦٦، ران ٧و ٨ (١٣٤٥)

١٦. سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، *گزارش قنات‌های دشت مشهد*، (١٣٤٣).

١٧. حافظی‌مقدس ن.، *ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد*، وزارت مسکن و شهرسازی استان خراسان رضوی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مدیریت منطقه شمال شرق (١٣٨٧).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]

۱۸. سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، *آماربرداری پیزومترهای واقع در محدوده شهر* (۱۳۸۷).

19. Yu H. S., "Cavity expansion methods in geomechanics", School of civil engineering, University of Nottingham, U. K. Kluwer Academic Publisher, Dordreched/ Boston/ London. ISBN: 978-0-412-79990-7 (2000).

20. Gonzalez C., Sagaseta C., "Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extension of Madrid Metro", Computers and Geotechnics, Vol. 28 (2001) 445–468, PIII:S0266-352X(01) 00007-6.

۲۱. بهپور گوهری م.، روحی مهر ا.، وفایی پور ر.، *مرجع کامل plaxis v8,* انتشارات فروزش (۱۳۸۵).

22. Manual of Plaxis software, general–information_v8, http://www.plaxis.nl (2002).

۲۳. سیدسجادی س. م..، *قنات (کاریز) تاریخچه، ساختمان و چگونگی گسترش آن در جهان*، انتشارات انجمن فرهنگی ایتالیا-تهران، تهران شماره یک (۱۳٦۱).

۲٤. بهنیا ع..، *قنات‌سازی و قنات‌داری*، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، چاپ اول (۱۳٦۷).

۲۵. کمیته تخصصی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، *آیین نامه طراحی ساختمان‌های آجری مسلح و نامسلح*، نشریه شماره ص-۱۱۱(۱۳۸۳).

۲٦. مستوفی‌نژاد، د.، سازه‌های *بتن آرمه بر اساس ACI 318-05 و آئین‌نامه بتن ایران (آبا)*، انتشارات ارکان دانش (۱۳۸۸).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.4.4]