



## بررسی میزان نشست سطح زمین در مسیر خط 2 قطار شهری مشهد با استفاده از روش محاسبات عددی

- سلمه افشار<sup>1</sup>، محمد غفوری<sup>2</sup>، مهران آراین<sup>3</sup>، سید محمد موسوی مداح<sup>4</sup>
1. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران؛
  2. استاد دانشکده علوم پایه و عضو هیأت علمی دانشگاه فردوسی مشهد؛
  3. عضو هیأت علمی و مدیر گروه زمین شناسی دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران؛
  4. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد؛
- [Salameh\\_1984@yahoo.com](mailto:Salameh_1984@yahoo.com)

### چکیده

با گسترش رفت و آمدهای درون شهری ضرورت نیاز به فضاهای زیرزمینی جهت تأسیسات و ارتباطات شهری روز به روز بیشتر احساس می شود. از سوی دیگر اجرای ایمن و در عین حال اقتصادی تونل ها مستلزم شناخت واکنش زمین در مقابل حفر تونل می باشد. این واکنش به صورت تغییر میدان تنش و تغییر مکان ها در توده اطراف تونل ظاهر می شود. در شرایطی که امکان نشست وجود دارد، برای حفر تونل و نگهداری آن باید از روشهایی استفاده کرد که نشست زمین به حداقل ممکن محدود شود. با توجه به اهمیت این مسأله، در این مقاله میزان نشست سطح زمین در مسیر خط دو قطار شهری مشهد و در اعماق مختلف، با استفاده از نرم افزار PLAXIS محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفته است.

**واژگان کلیدی:** خط دو قطار شهری مشهد، نشست سطح زمین، نرم افزار PLAXIS.

## Evaluation of land surface subsidence along the second line train of Mashhad city with using numerical method

Salameh Afshar, Mohammad Ghafouri, Mehran Arian, Seyed Mohammad Mousavi Mada  
[Salameh\\_1984@yahoo.com](mailto:Salameh_1984@yahoo.com)

### Abstract

Underground spaces for urban facilities and communications need to be expended for inter city travel. The recognition of the safe and economical tunnel drilling and ground reaction must be investigated. This reaction changes the ground behavior and the stress field around the tunnel. Because of the subsidence possibility, the maintenance procedures should be used to limit the subsidence drilling the tunnelling work. In this study the PLAXIS software was used to calculate the land surface subsidence along the second line train of Mashhad city in different depths.

**Keywords:** line 2 of the Mashhad subway, land surface subsidence, PLAXIS



## مقدمه

حفر تونل باعث تغییر شرایط تنش در زمین شده که این مسأله موجب تغییر شکل هایی در آن خواهد گردید. به این ترتیب که تاج تونل بر اثر حفاری نشست می کند که ممکن است نهایتاً به نشست سطح زمین منجر شود. یکی از مشکلترین جنبه های مهندسی تونل، ارزیابی آثار تغییر شکل بر سطح زمین و خطرات بالقوه ای است که برای ساختمانهای واقع در بالای تونل و محدوده اطراف آن ممکن است ایجاد شود. در شرایطی که امکان نشست وجود دارد، برای حفر تونل و نگهداری آن باید از روشهایی استفاده کرد که نشست زمین به حداقل ممکن محدود گردد [1]. به طور کلی تغییر شکل های ایجاد شده در توده خاک اطراف گودبرداری به 3 بخش تقسیم می شود:

(1) تغییر شکل های کف گود (2) آماس کف گود (3) نشست سطحی.

تخمین نشست و پیش بینی توزیع آن قبل از گودبرداری به دلیل اثرات سوئی که به ساختمانها و تأسیسات مجاور آن می گذارد امری مهم به شمار می رود. روش های عددی و روش های مبتنی بر مشاهدات و اندازه گیری با ابزار دقیق، دو راه عمومی برای پیش بینی نشست های سطحی ناشی از گودبرداری می باشند. اکثر فرمول ها و روابط کلی که برای تخمین نشست ارائه شده اساساً مبتنی بر تئوریات و تجربیات بوده و روش های عددی عمدتاً در مطالعات موردی به کار رفته اند. زیرا در یک مورد خاص می توان با تغییراتی در پارامترهای مدل و یا آنالیز برگشتی به جواب واقعی نزدیک شد و تغییر شکل های ناشی از مراحل بعدی ساخت را پیش بینی کرد [2].

## 2- بررسی میزان نشست سطح زمین

### الف) روش تئوری

محیط زمین در ابتدا تحت تنش ناشی از تنشهای طبیعی زمین بوده که بر اثر حفر تونل شرایط تنش در زمین تغییر می کند. این امر موجب انقباض دهانه تونل و بوجود آوردن تغییر شکلهایی در مقطع زمین می شود، که نهایتاً به نشست سطحی زمین منجر می گردد. مسأله نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل با توجه به اهمیتی که داشته همواره از سوی محققین مختلف تحت بررسی قرار گرفته است تا با اتخاذ شیوه های مناسب میزان آن را قبل از شروع عملیات ساخت برآورد کنند [3]. Peck (1969) یک گزارش مدون حاوی جمع آوری کلی عملیات اجرایی تونل در زمین های نرم تا آزمون را ارائه نمود، آنگاه در بررسی های مفصل خود، زمین های نشست پذیر را به چهار گروه تقسیم نمود. سپس برای هر کدام از انواع خاک ها، اندازه گیری های انجام شده برای تونل های واقع در این خاک ها را ذکر نمود [4]. او نشان داد که منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل دارای توزیع نرمال می باشد. و یک رابطه به صورت زیر برای پروفیل نشست سطحی ارائه نمود:

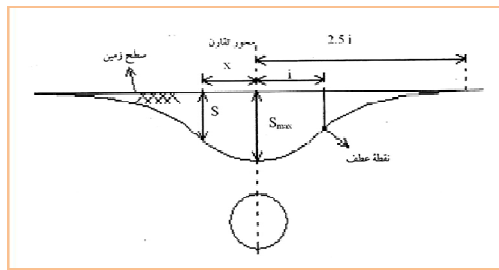
$$S = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

که در آن:

- S: میزان نشست سطح زمین
- $S_{\max}$ : بیشترین میزان جابه جایی عمودی سطح زمین
- X: فاصله نشست سطح زمین در نقطه مورد نظر تا بیشترین میزان جابه جایی سطح زمین
- i: فاصله بیشترین میزان نشست تا نقطه عطف منحنی نشست در سطح زمین



این رابطه پایه تئوری نداشته و به علت شباهت آن به شکل تجربی نشست انتخاب شده است. در رابطه (1) دو پارامتر  $i$  و  $S_{max}$  تعیین کننده می باشند و تحقیقات بسیاری جهت تعیین این مقادیر صورت گرفته و پیشنهادهای گوناگونی به منظور محاسبه مقدار آنها داده شده است. عمده تحقیقات صورت گرفته در جهت اصلاح رابطه (1) و تعیین پارامتر  $i$  می باشند (شکل 1).



شکل 1: منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل

پارامتر مهم دیگر در رابطه پیشنهادی پک، پارامتر  $S_{max}$  می باشد. به منظور بدست آوردن رابطه ای جهت محاسبه مقدار این پارامتر، پارامتری بدون بعد به نام افت زمین (Ground Loss) تعریف می شود که در واقع معادل با میزان انقباض دهانه تونل است. در خاک های رسی که معمولاً در حین حفاری تونل، شرایط زهکشی نشده حاکم می باشد و لذا حجم منقبض شده در دهانه تونل با حجم خاک نشست کرده در سطح زمین برابر است، مقدار این پارامتر با نماد  $V_L$  از رابطه زیر تبعیت می نماید [4].

(2)

$$V_L = \frac{4v_s}{\rho D^2}$$

$D$  قطر تونل و  $V_L$  کاهش حجم زمین نسبت به حفاری بوده که بصورت درصدی از نشست حجم فرو نشست در سطح زمین به حجم تونل در واحد طول محاسبه می شود.  $V_s$  حجم کل نشست سطح زمین می باشد و مقدار آن از انتگرال گیری رابطه (1) به صورت زیر بدست می آید:

$$V_s = \sqrt{2\rho} i s_{max} \quad (3)$$

با ترکیب روابط (2) و (3) و همچنین در نظر گرفتن  $i = Kz$  می توان رابطه زیر را برای پارامتر  $S_{max}$

استنتاج نمود:

$$S_{max} = \frac{0.313 V_L D^2}{Kz} \quad (4)$$



در رابطه  $i = Kz$ ،  $Z$  عمق قرار گیری تونل و  $K$  ضریبی ثابت بوده که New & O'reilly (1982) مقدار  $K$  را به نوع خاک نسبت داده و برای خاک های رسی مقدار  $0/5$  و برای خاک های ماسه ای مقدار  $0/25$  را پیشنهاد نمودند [5].

همچنین Rankin (1998) مطالعاتی بر روی اندازه گیریهای انجام شده در تونل هایی در انگلستان و دیگر نقاط جهان انجام داد و با ترسیم مقدار  $i$  در مقابل  $Z$  به این نتیجه رسید که مقدار  $K = 0.5$  برای اغلب اندازه گیری های مذکور، مقداری مناسب می باشد [6]. در رابطه (2) کاهش حجم ( $V_L$ ) یک پارامتر مهم و اساسی در نشست سطحی زمین محسوب می شود. مقدار این پارامتر به نوع خاک و روش تونل زنی بستگی دارد. Mair & Taylor (1998) دامنه ای از کاهش حجم ( $V_L$ ) برای تکنیکهای ساخت مختلف تونل زنی و انواع خاک ها در جدول (1) عنوان نمودند [7].

جدول 1: کاهش حجم ( $V_L$ ) برای خاکها و روشهای حفاری مختلف [7]

$V_L$		خاک	روش ساخت
حداکثر	حداقل		
1/3	0/2	ماسه نرم شل	EPB/ slurry TBM
2	1	رس نرم	
1	0/03	رس ماسه دار سخت	
1	0/2	ماسه شل	
2	1	رس سخت	TBM
0/5	0/5	رس لندن	NATM

### (ب) روش عددی

برای بررسی میزان جابه جایی سطح زمین در اثر حفر تونل در مسیر خط دو قطار شهری مشهد از نرم افزار PLAXIS v8 استفاده گردید. این برنامه از امکانات گرافیکی ساده ایی استفاده می کند تا کاربر را برای ایجاد مدل ژئوتکنیکی و مش بندی المان محدود که بر مبنای مقطع های عرضی عمودی که معرف وضعیت موجود است قادر سازد [8]. از مزایای استفاده از آن می توان به پیش بینی کلی رفتار خاک و کم هزینه بودن آن اشاره کرد [9]. در این بخش ابتدا جهت مدلسازی از مدل موهر-کولمب استفاده گردیده است که این مدل دارای 5 پارامتر اصلی: مدول الاستیسیته ( $E$ )، ضریب پواسون ( $\nu$ )، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )، چسبندگی ( $C$ ) و زاویه اتساع ( $\psi$ ) می باشد [10]. سپس با متغیر قرار دادن عمق قرار گیری تونلی با قطر  $8/5$  m در طول مسیر، بهترین عمق برای قرار گیری تونل پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه در طول مسیر لایه های خاک از تنوع بالایی برخوردار بوده و یکنواخت نمی باشند، لذا در مدلسازی عددی نیز از 5 پروفیل مجزا شده مشابه شکل (2) استفاده گردید. برای هر پروفیل به طور جداگانه موقعیت تونل از عمق 10 متری تا 24 متری بررسی شده و  $S_{max}$  برای هر عمق محاسبه گردیده است. سپس عمقی که کمترین میزان  $S_{max}$  را داشته در هر پروفیل تعیین گردید. جدول (2) لایه های تعیین شده برای هر پروفیل را جهت مدلسازی عددی نشان می دهد و جدول (3) بیانگر محاسبات عددی از عمق 10 متر تا 24 متری برای هر پروفیل می باشد. کمترین میزان جابه جایی سطح زمین

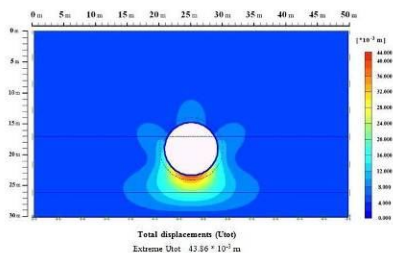




جدول 3: میزان جابه‌جایی اندازه‌گیری شده از عمق 10 تا 24 متری توسط محاسبات عددی در هر پروفیل

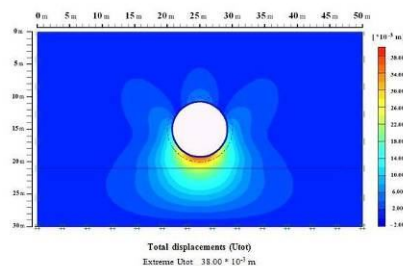
عمق (m)	$S_{max}$ ( $\times 10^{-3}$ m) در پروفیل 1	$S_{max}$ ( $\times 10^{-3}$ m) در پروفیل 2	$S_{max}$ ( $\times 10^{-3}$ m) در پروفیل 3	$S_{max}$ ( $\times 10^{-3}$ m) در پروفیل 4	$S_{max}$ ( $\times 10^{-3}$ m) در پروفیل 5
10	10.49	13.92	10.46	16.91	11.61
11	7.74	11.13	8.24	13.8	10.62
12	5.46	8.68	5.8	19.87	9.54
13	5.17	9.39	5.01	12.27	8.29
14	3.06	7.51	3.69	5.9	7.88
15	1.45	3.62	6.62	7.29	4.48
16	10.02	4.12	8.81	4.94	5.54
17	6.71	5.65	10.58	5.99	5.65
18	13.4	7.21	11.78	8.98	8.52
19	8.77	1.48	12.71	10.83	3.9
20	9.57	10.32	13.56	12.53	11.89
21	10.32	11.92	14.3	14.13	7.53
22	15.39	13.87	14.91	8.95	14.83
23	15.64	15.43	15.39	10.77	16.64
24	15.65	16.75	15.82	17.94	18.56

اگر چه این مسأله واضح است که با افزایش عمق قرارگیری تونل میزان نشست کل به دلیل تحمل بارهای وارده توسط ذرات کاهش می‌یابد اما همانطور که در جدول فوق مشاهده می‌شود میزان جابه‌جایی سطح زمین با افزایش عمق قرارگیری تونل تا رسیدن به یک عمق بهینه کاهش می‌یابد و از این عمق به بعد افزایش پیدا می‌کند. که دلیل این مسأله را می‌توان جنس لایه‌های خاک رویی بیان نمود. این عمق در پروفیل شماره (1) 15 متری در پروفیل (2) 19 متری، در پروفیل (3) 14 متری، در پروفیل (4) 16 متری و در پروفیل شماره (5) 19 متری می‌باشد. نتایج بدست آمده از خروجی Plaxis برای هر پروفیل در عمق‌های تعیین شده در شکل‌های 3 تا 7 نشان داده شده است.



شکل 4: موقعیت قرارگیری تونل در عمق کمترین جابه‌جایی

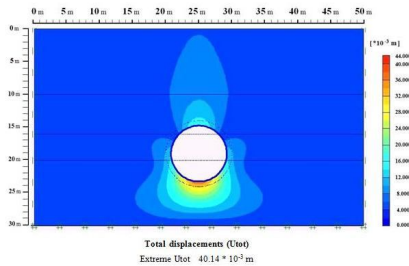
در محیط نرم افزار Plaxis (پروفیل 2)



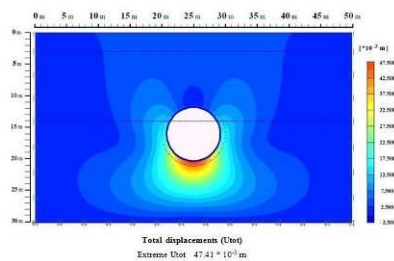
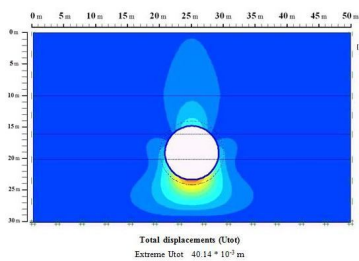
شکل 3: موقعیت قرارگیری تونل در عمق کمترین جابه‌جایی

سطحی

در محیط نرم افزار Plaxis (پروفیل 1)



شكل 5: موقعيت قرارگيري تونل در عمق كمترين جابه جايي سطحى در محيط نرم افزار Plaxis (پروفيل 3)



شكل 7: موقعيت قرارگيري تونل در عمق كمترين جابه جايي

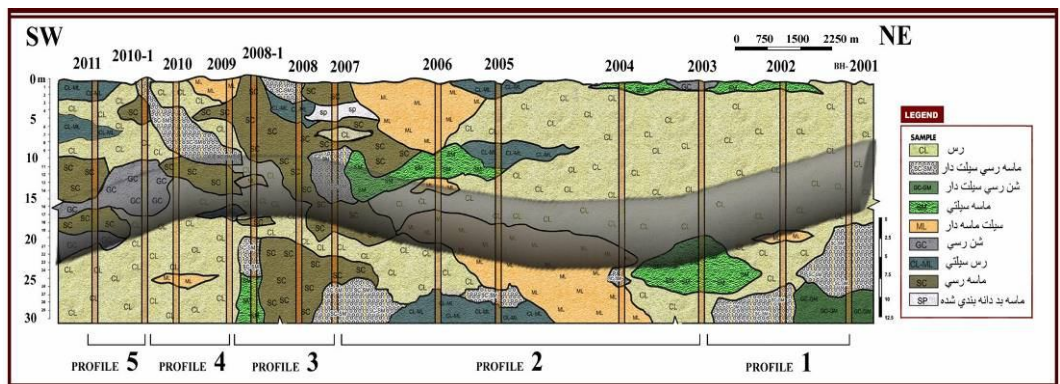
شكل 6: موقعيت قرارگيري تونل در عمق كمترين جابه جايي سطحى

در محيط نرم افزار Plaxis (پروفيل 5)

در محيط نرم افزار Plaxis (پروفيل 4)



در اشکال (3) تا (7) منطقه رنگی میزان جابه جایی کل را در توده ی خاک اطراف تونل نشان می دهد. نقطه مشترک در این شکل ها، موقعیت بیشترین میزان نشست زمین است که در کف تونل مشاهده می گردد. توزیع کمیت ها در مقاطع عرضی برای تغییر مکانها در نرم افزار (Plaxis v8) از درون یابی اطلاعات گرهی بدست می آید [13]. پرواضح است که با ایجاد حفره در یک توده خاک در اطراف فضای ایجاد شده تنش صورت می گیرد. با آزاد سازی تنش، ذرات در لایه های سست شده نسبت به فضای ایجاد شده عکس العمل نشان می دهند و این عکس العمل به صورت تغییر مکان است. لذا طبیعتاً هرچه تونل به سطح زمین نزدیکتر باشد، بردارهای تغییر مکان تأثیر بیشتری در سطح زمین گذاشته و جابه جایی های بیشتری را در سطح ایجاد می کنند. اما خروجی های Plaxis نشان می دهد که جنس لایه ها نیز در میزان نشست تأثیر مستقیم دارد. به منظور روشن تر شدن وضعیت موجود عمق های تعیین شده در هر پروفیل بر روی پروفیل کل مسیر به صورت شماتیک رسم گردیده است تا وضعیت لایه های موجود در مسیر قرارگیری تونل نیز مشخص گردد (شکل 8).



شکل 8: عمق بهینه استقرار تونل در مسیر خط دو قطار شهری مشهد با استفاده از محاسبات عددی

شکل (8) نشان می دهد که بهترین عمق قرارگیری تونل در جایی است که حتی الامکان در لایه های ریزدانه نباشد. به استثنای پروفیل (1) و (2) که بیشتر مسیر را خاک های ریزدانه و رسی تشکیل می دهند، در ادامه ی مسیر شاهد قرارگیری تونل در لایه های درشت دانه تر و با کیفیت بهتر هستیم. بدین ترتیب به نظر می رسد که ابتدای مسیر (پروفیل 1 و 2) به دلیل فراوانی خاک های ریزدانه و بالأخص رس نیاز به بهسازی داشته باشد.

### 3- نتیجه گیری

در مطالعات موردی برای تخمین میزان نشست می توان از محاسبات عددی استفاده نمود. روش های عددی می توانند در یک مورد خاص با تغییراتی در پارامترهای مدل و یا آنالیز برگشتی جوابی نزدیک به واقع را بدهند و تغییر شکل های ناشی از مراحل بعدی ساخت را پیش بینی کنند. از مزایای استفاده از روش های عددی می توان به پیش بینی کلی رفتار خاک و کم هزینه بودن آن اشاره کرد.





- محاسبات عددی کمترین میزان نشست سطحی زمین را در پروفیل شماره (1) در 15 متری، پروفیل (2) 19 متری، پروفیل (3) 14 متری، پروفیل (4) 16 متری و پروفیل شماره (5) در 19 متری نشان می دهد. بدین ترتیب می توان براساس کمترین میزان نشست سطح زمین، عمقی بهینه برای استقرار تونل تعریف نمود. کنترل عمق قرارگیری تونل یکی از روش های کنترل میزان جابه جایی سطحی زمین و یا نشست کل می باشد.
- جنس لایه های خاک در مسیر خط دو قطار شهری مشهد نشان می دهد که ابتدای مسیر به طور عمده از خاک های ریزدانه تشکیل شده اند و به منظور جلوگیری از افزایش میزان نشست زمین نیاز به بهسازی خواهند داشت.

#### 4- تشکر و قدردانی

از " مسئولین محترم قطار شهری مشهد " و " شرکت مهندسين مشاور جهد آزماي مشهد " جهت در اختيار گذاشتن اطلاعات و منابع لازم قدردانی می گردد.

#### 5- منابع

1. معماریان، حسین، 1384، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم.
2. شریعتمداری، نادر؛ معظمی، مجید؛ چایچی، پیمان؛ بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل به روش ترانسه باز در متروی تبریز؛ جاده شماره 54، ص 26.
3. پاکباز، محمد؛ حیدری زاده، یوسف؛ 1387؛ بررسی نشست خاک در اثر حفر تونل شهری اهواز؛ چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
4. Peck, R., 1969, "Deep excavation and tunnelling in soft ground", Proceeding of 7th Int. Conf. on Soil mechanics and foundation Eng, pp. 225-290.
5. O'Reilly, M. P. and New, B. M., 1982, "Settlement above tunnels in the United Kingdom- their magnitude and prediction", Tunnelling 82, London, IMM, pp. 173-181.
6. Rankin, W. J., 1998, Ground Movements Resulting from Urban Tunnelling: Predictions and Effects, From Bell, F. G., Culshaw, M. G. Cripps, J. c and Lovell, M. A. (eds), Engineering Geology for Underground Movements, Geological Society Eng. Geo. Special Publication, No. 5, pp. 79-92.
7. Mair, R. J., Taylor, R.N. and Bracegirdle, A., 1993, " Subsurface settlement profiles above tunnel in clays". Geotechnique, Vol. 43, No.2, pp.315-320.
8. بهپور گوهری، محمد؛ روحی مهر، امیر؛ وفایی پور، رامین؛ 1385؛ مرجع کامل PLAXIS V8؛ انتشارات فروزش، ص 155.
9. وطن پور، آرزو؛ ستوده، علیرضا؛ فرهیخته، عرفان؛ بررسی ریاضی رفتار متقابل خاک- سازه در سازه های ویژه واقع در مسیر تونل های عمیق مترو شیراز و مقایسه نتایج عددی حاصله با رفتار واقعی ثبت شده توسط ابزار دقیق، Saba Structural & Architectural Engineering Company
10. نعمتی، علی؛ 1384؛ تحلیل عددی تأثیر عمق حفاری روی رفتار یک توده خاک ماسه ای رس دار به روش اجزاء محدود؛ فصلنامه علمی ترویجی ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، شماره 103.
11. شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان، 1384، [www.khrw.ir](http://www.khrw.ir)
12. علیزاده، امین، 1383، استفاده از آبهای غیرمتعارف (فاضلاب) در دشت مشهد، شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان، کمیته تحقیقات.
13. بهپور گوهری، محمد؛ روحی مهر، امیر؛ وفایی پور، رامین؛ 1385؛ مرجع کامل PLAXIS V8؛ انتشارات فروزش، ص 340.