

ارائه و بررسی روش خشکاندازی همزمان با گودبرداری برای کاهش نشست حاشیه گود

مهدی خسروی^۱، سید حسین قریشی نجف آبادی^۲، محمد حسین خسروی^{۳*}

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه شهید بهشتی
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی
۳- استادیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران

*mh.khosravi@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۶/۲۲]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۵/۰۴]

چکیده

یکی از مهمترین مسائلی که در طراحی فضاهای زیرزمینی و گودهای ساختمانی عمیق باید به آن توجه داشت بحث آب‌های زیرزمینی و چگونگی مقابله با آن است. پیامدهای آب زیرزمینی بر یک پروژه ساختمانی بسیار گسترده بوده و بر طراحی سازه ای، برنامه اجرایی و هزینه های کلی پروژه تاثیر می‌گذارد. با توجه به اینکه در نواحی آب گرفته، مهاربندی و اجرای سازه های نگهدارنده، آب باید از ناحیه گودبرداری به بیرون پمپاژ شود که به این عمل خشکاندازی گفته می‌شود. عملیات خشکاندازی گاهی منجر به نشست زمین در مناطق اطراف کارگاه شده که با وارد شدن خسارت به ساختمان‌های موجود نیز ممکن است همراه باشد. روش‌های مهاربندی آب‌بند و تغذیه مصنوعی از جمله راهکارهایی هستند که می‌توانند به نوعی نشست ناشی از خشکاندازی را کاهش دهند ولی این روش‌ها بسیار زمان‌بر بوده و در عین حال هزینه زیادی را نیاز دارند. بنابراین ارائه راهکاری مناسب که بتواند با صرف هزینه و زمان کمتر مقدار نشست ناشی از خشکاندازی را کاهش دهد امری ضروری است. راهکار عملی ارائه شده در این پژوهش، استفاده از روش خشکاندازی همزمان با گودبرداری بوسیله تنظیم پمپاژ از چاه‌های زهکش است. روش مذکور در این پژوهش بر تخمین زمان‌های توقف و اجرا و تنظیم مقادیر پمپاژ بر اساس تراز سطح آب مورد انتظار، با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS2D استوار است. از نتایج روش خشکاندازی همزمان با گودبرداری می‌توان به کاهش حدود ۲۰ و ۹ درصدی در نشست ناشی از خشکاندازی و نشست کل در طی عملیات گودبرداری و همچنین کاهش حدود ۲۲ درصدی نشست نامتقارن پی مجاور در این پروژه اشاره کرد. با توجه به این که طراحی سازه نگهدارنده گود در مجاورت ساختمان‌های بلندمرتبه و حساس، بر اساس کنترل تغییر مکان‌ها صورت می‌گیرد این موضوع می‌تواند تاثیر زیادی در هزینه‌های طرح داشته باشد. از فواید زیست محیطی روش خشکاندازی همزمان با گودبرداری نیز می‌توان به کاهش حدود ۶۸ درصدی مقدار آب خروجی از زمین طی مراحل گودبرداری اشاره کرد و نیز کاهش زمان و هزینه عملیات خشکاندازی از دیگر مزایای روش مذکور است.

واژگان کلیدی: آب‌های زیرزمینی، گودبرداری، خشکاندازی، نشست زمین، PLAXIS2D

۱- مقدمه

عمیق و تونل‌های مترو در محیط شهری پدیده فرونشست زمین باعث بروز مشکلاتی شده است. سازوکار این نوع نشست بدین صورت

در سالهای اخیر به دلیل خشکاندازی در کنار گودبرداری‌های

مشکلات نشست را ایجاد می‌کند. یک رویکرد متداول استفاده از روش‌های اجزاء محدود با ایجاد یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل‌سازی عددی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک است [3].

زوهو³ و همکاران، دیواره دیافراگمی حاشیه گود عمیق یکی از ایستگاه‌های خط ۱۰ متروی شانگهای چین که برای جلوگیری از هجوم آب زیرزمینی به داخل آن احداث شده بود را با استفاده از روش المان محدود مدل‌سازی کردند. آنها با بهینه کردن عمق دیواره دیافراگمی موفق شدند میزان نشست زمین‌های مجاور گود را به حداقل برسانند [4].

بودو⁴ و آدیامان⁵، با استفاده از نظریه کسرات⁶ در محیط‌های پیوسته به تحلیل پدیده نشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی پرداختند. بر اساس تئوری پیشنهادی آنها، نشست ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی از سه قسمت شامل تراکم قائم حاصل از افزایش تنش مؤثر، تغییر مکان برشی و چرخش بزرگ‌مقیاس لایه‌های خاک تشکیل می‌شود. از دیگر نتایج این پژوهش این است که هرگاه طول مخروط افت چاه پمپاژ بیشتر از $\sqrt{2}$ برابر ضخامت آبخوان باشد، نشست برشی حاکم می‌شود [5].

جیانگ⁷ و فنگ⁸، در پژوهشی با عنوان «مدلسازی عددی نشست ناشی از برداشت آب بر اساس تئوری تحکیم ویسکوالاستوپلاستیک بایوت» به بررسی پدیده نشست زمین و ترک‌های سطحی ناشی از این نشست پرداختند. از مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان به این نکته اشاره کرد که بطور متوسط فاصله زمانی کاهش سطح آب زیرزمینی و ظهور آثار نشست ناشی از این کاهش بر سطح زمین در حدود یک ماه است [6].

بودیه‌رجو⁹ و همکاران، پژوهش گسترده‌ای در رابطه با تأثیر چینش و تعداد چاه‌های زهکش بر نشست پی‌ها در شرایط بارگذاری‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS2D انجام داده‌اند. نتیجه کار آنها نشان داد که تمامی چینش چاه‌ها الگوی نشست مقارنی با بیشینه نشست در مرکز ناحیه را نشان می‌دهد و با افزایش تعداد چاه‌ها مقدار نشست زمین نیز افزایش پیدا می‌کند [7].

است که در اثر زهکشی آب از لایه‌های زمین، فشار آب حفره‌ای کاهش یافته و تنش مؤثر افزایش می‌یابد و باعث تراکم خاک می‌شود. در اثر تراکم، ساختمان دانه های خاک به هم خورده و نشست زمین اتفاق می‌افتد [1].

خشک‌اندازی از راه‌های مختلفی می‌تواند باعث بروز نشست زمین شود که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

الف- خارج ساختن ریزدانه خاک از طریق چاه‌های پمپاژ با اجرای نامناسب چاه.

ب- رگاب و جوشش در کف گود در حالت پمپاژ روباز آب از داخل گود که می‌تواند باعث کاهش مقاومت خاک، گسیختگی و حرکت در توده خاک و در نتیجه نشست بیشتر ساختمان‌های مجاور گود شود.

ج- تراکم خاک‌های تراکم پذیر یا پوک در اثر افزایش تنش مؤثر. دو علت نخست را به آسانی می‌توان کنترل کرد. اما در مواردی که خاک‌های تراکم پذیر یا سایر خاک‌های ضعیف در نزدیکی سیستم خشک‌اندازی وجود داشته باشد، حتی با اجرای درست سیستم خشک‌اندازی، احتمال وقوع نشست وجود خواهد داشت.

تلاش بشر در کنترل آب‌های زیرزمینی، تاریخ طولانی دارد. رابرت استفن سن¹ راه‌آهن و پل‌ساز بزرگ انگلیسی در زمان ساخت تونل کیلسن بی² در مسیر لندن-بیرمنگام در دهه ۱۹۳۰ و در جریان عملیات زهکشی تونل مذکور با پدیده جوشش ماسه (که یکی از عوامل مهم ایجاد نشست است) مواجه شد و پس از چندین شکست توانست از طریق افزایش تعداد چاه‌ها که باعث کاهش دبی پمپاژ از آنها می‌شد، با موفقیت جوشش را کنترل کند. در پناه پیشرفت‌های بزرگی که در پنجاه سال گذشته انجام شده بخش بزرگی از ابهامات ناشی از آب‌های زیرزمینی در پروژه‌ها برطرف شده است اما هنوز مسائلی از قبیل نشست و پیامدهای زیست محیطی ناشی از خشک‌اندازی بطور کلی حل نشده‌اند [2].

مدل جریان آب در خاک با استفاده از راه حل‌های تحلیلی می‌تواند بسیار پیچیده باشد. نهشته‌های خاک طبیعی معمولاً غیرهمگن است. علاوه بر این، شرایط مرزی اغلب با زمان تغییر می‌کند و همیشه نمی‌تواند به طور مسلم با یک تعریف مشخص تحلیل شود. این پیچیدگی‌ها ضرورت استفاده از روش‌های عددی برای بررسی

3 Zhou

4 Budhu

5 Adiyaman

6 Cosserat

7 Jiang

8 Feng

9 Budihardjo

1 Robert Stephenson

2 Kilsen B

۳- رابطه تحلیلی نشست ناشی از پمپاژ آب

با توجه به این که تراکم در نتیجه کاهش حجم فضاهای خالی خاک (V_v) است، فرونشست را می‌توان توسط روابط زیر بیان کرد.

$$\delta_u = V_{v_t} - V_{v_{t+1}} \quad (۱)$$

V_{v_t} و $V_{v_{t+1}}$ به ترتیب حجم فضای خالی در زمان‌های t و $t+1$ در واحد سطح است.

$$V_{v_t} = e_t V_s \quad (۲)$$

V_s حجم دانه‌های جامد خاک در واحد سطح و e_t تخلخل در زمان t است.

$$Z_t = V_{v_t} + V_s \quad (۳)$$

Z_t ارتفاع کل در زمان t است.

بنابراین:

$$V_s = \frac{Z_t}{1+e_t} \quad (۴)$$

با نوشتن رابطه (۲) برای زمان‌های t و $t+1$ و جایگزینی آن در رابطه (۱) نشست یک لایه خاک به عنوان تابعی از ارتفاع اولیه لایه و تغییر تخلخل در یک محدوده زمانی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\delta_u = Z_t \frac{e_t - e_{t+1}}{1+e_t} \quad (۵)$$

δ_u مقدار فرونشست در یک گام زمانی، و e_{t+1} تخلخل در زمان $t+1$ می‌باشد.

همانطور که می‌دانیم تنش مؤثر در هر نقطه خاک از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\sigma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w)h \quad (۶)$$

که در آن σ' تنش مؤثر قائم، γ_{sat} وزن واحد حجم خاک در حالت اشباع، γ_w وزن واحد حجم آب و h ارتفاع ستون خاک روی نقطه مورد نظر است. برای محاسبه میزان فرونشست در اثر افزایش تنش مؤثر σ' ، رابطه بین σ' و تخلخل e در مواد مورد نظر باید معلوم شود. نمونه‌هایی از رابطه e در مقابل σ' نشان می‌دهد که در صورت افزایش σ' ، به دلیل آرایش دوباره ذرات، e کاهش می‌یابد [9,10].

از جمله روش‌های مرسوم برای تعیین نشست ناشی از افزایش تنش مؤثر، روش لگاریتمی است. با توجه به بررسی‌های ترقاقی^۱ و پک^۲ (۱۹۴۸) وقتی e در مقابل $\log \sigma'$ رسم شود، منحنی‌های S بدست می‌آیند که شیب قسمت خطی منحنی بصورت زیر بیان می‌شود.

در یک مطالعه موردی در منطقه ۲ تهران سهم نشست ناشی از خشک‌اندازی در عملیات گودبرداری در حدود ۳۰ درصد از کل نشست پشت دیواره برآورد شده است که این امر حاکی از اهمیت زیاد عملیات خشک‌اندازی در نشست حاشیه گود ساختمانی است [8].

راهکار ارائه شده در این پژوهش، استفاده از روش خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری بوسیله تنظیم پمپاژ از چاه‌های زهکش است. این عمل با تخمین زمان‌های توقف و اجرا و تنظیم مقادیر پمپاژ بر اساس تراز سطح آب مورد انتظار، در نرم‌افزار PLAXIS2D انجام گرفته است.

۲- معرفی روش خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری

عملیات گودبرداری در مرحله خاکبرداری و حفاری دارای دو زمان شامل اجرا و توقف می‌باشد.

زمان اجرا برای یک مرحله از گودبرداری به زمانی گفته می‌شود که در آن عملیات خاکبرداری در حال انجام باشد. در مقابل، زمان توقف یک مرحله از گودبرداری زمانی است که در آن خاکبرداری متوقف شده و عملیات حفاری و نیلینگ در حال انجام باشد.

برای انجام عملیات پمپاژ همزمان با گودبرداری می‌توانیم از زمان توقف یک دیواره جهت پمپاژ آب و خشک‌اندازی استفاده کنیم به این صورت که در زمان توقف مرحله اول گودبرداری سطح آب را تا پایین‌تر از تراز مرحله دوم، و در زمان توقف مرحله دوم، سطح آب را تا پایین‌تر از تراز مرحله سوم گودبرداری پایین ببریم و این روند تا انتهای گودبرداری در تمامی مراحل، مطابق شکل (۱) ادامه پیدا می‌کند [8].

شکل ۱. خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری بوسیله تنظیم مقدار پمپاژ

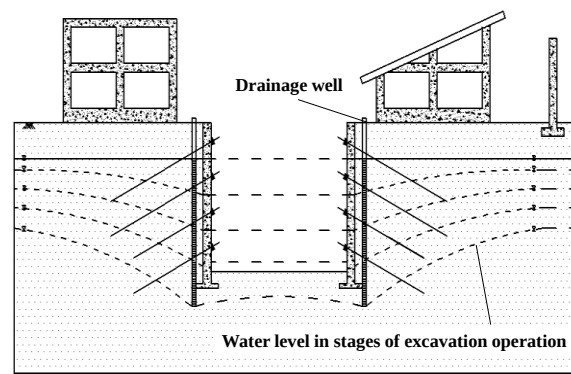


Fig. 1. Simultaneous dewatering – excavation by setting the amount of pumping

1 Terzaghi

2 Peck

استفاده شده است. خاک منطقه مطالعه شده شن رس‌دار و مخلوط شن و ماسه و رس با سیمان‌شدگی نسبی است [8].

شکل (۲) محوطه گودبرداری و موقعیت ساختمان‌های مجاور آن را نشان می‌دهد. به دلیل وجود ساختمان ۲۰ طبقه و در نتیجه اعمال بیشترین سربار در مقطع A-A، برای مدلسازی و مقایسه نتایج این مقطع انتخاب شده است.

۴-۱- چگونگی مدلسازی و مشخصات طرح

بیشتر برای حل مسائل پیچیده مهندسی با بکارگیری تئوری‌های موجود، معادلات حاکم بر محیط نوشته می‌شود و سپس با استفاده از روش‌های تحلیلی یا عددی معادلات حل می‌شوند. از آنجا که بیشتر مسائل مهندسی دارای شرایط مرزی نسبتاً پیچیده است، استفاده از روش عددی المان‌های محدود برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر محیط بسیار معمول است [12].

PLAXIS2D یک نرم‌افزار المان محدود پیشرفته برای تحلیل تغییر-شکل ها و پایداری در پروژه های مهندسی ژئوتکنیک است. در مسائل مهم ژئوتکنیک، با توجه به هدف مورد نظر، معمولاً یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدلسازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک پیش‌بینی می‌شود. با این نرم افزار می‌توان خاکبرداری و خاکریزی مرحله‌ای با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المان‌های مثالی ۶ و ۱۵ گرهی مدل سازی نمود [13].

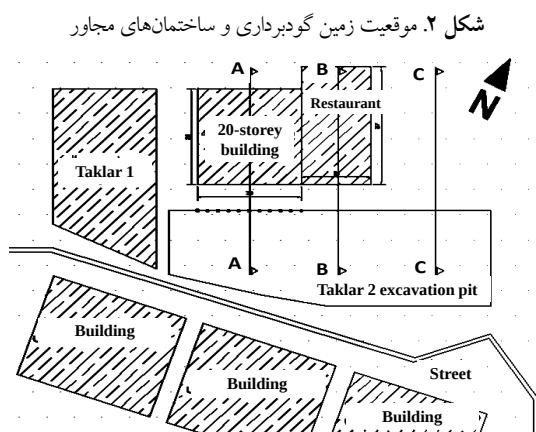


Fig. 2. Location of excavation pit and adjacent buildings

در این پژوهش برای دقت بیشتر در حصول نتایج و مقایسه دقیق‌تر از المان‌های ۱۵ گرهی و با توجه به نوع خاک ناحیه مطالعه شده از مدل خاک سخت‌شونده که نوعی مدل الاستیک غیرخطی

$$\tan \alpha = \frac{\Delta e}{\log \dot{\sigma}_{t+1} - \log \dot{\sigma}_t} = \frac{\Delta e}{\log \frac{\dot{\sigma}_{t+1}}{\dot{\sigma}_t}} \quad (7)$$

$\dot{\sigma}_t$ و $\dot{\sigma}_{t+1}$ به ترتیب تنش مؤثر قائم در زمان‌های t و $t+1$ است. شیب مذکور، اندیس تراکم (C_c) نامیده می‌شود. بدین ترتیب معادله یاد شده را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\Delta e = C_c \log \frac{\dot{\sigma}_{t+1}}{\dot{\sigma}_t} \quad (8)$$

با جایگذاری طرف راست این معادله در معادله (۵)، معادله کلی تراکم حاصل می‌شود.

$$\delta_u = Z_t \frac{C_c}{1+e_t} \log \frac{\dot{\sigma}_{t+1}}{\dot{\sigma}_t} \quad (9)$$

در موارد عملی می‌توان جمله $\frac{C_c}{1+e_t}$ را با ضریب تراکم C_u جایگزین کرد (کولین^۱ و پوتما^۲ ۱۹۴۴) در نتیجه معادله کلی تراکم به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\delta_u = Z_t C_u \log \frac{\dot{\sigma}_{t+1}}{\dot{\sigma}_t} \quad (10)$$

در روش خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری برای محاسبه نشست تجمعی در پایان خشک‌اندازی، محدوده مورد نظر مانند یک خاک لایه لایه در نظر گرفته شده است که در هر مرحله پمپاژ، سطح آب از بالای یک لایه به پایین آن تنزل می‌یابد و سپس تنش مؤثر در مرکز آن لایه محاسبه می‌شود. با توجه به ضخامت لایه و همچنین مقادیر تنش مؤثر مرکز لایه قبل و بعد از پمپاژ و با استفاده از رابطه (۱۱) مقادیر نشست در پایان تمامی مراحل پمپاژ محاسبه می‌شود.

$$\delta_u = C_u \sum_{i=1}^n (Z_t)_i \log \left(\frac{\dot{\sigma}_{t+1}}{\dot{\sigma}_t} \right)_i \quad (11)$$

$(Z_t)_i$ ارتفاع لایه i ام در زمان t و $\left(\frac{\dot{\sigma}_{t+1}}{\dot{\sigma}_t} \right)_i$ نسبت تغییرات تنش مؤثر لایه i ام در یک گام زمانی (که در اینجا یک مرحله پمپاژ است) است [11].

۴- معرفی پروژه

گود ساختمانی تک‌لار ۲ (مجتمع تجاری اداری هرمزان) یکی از پروژه‌های بزرگ گودبرداری در منطقه ۲ تهران می‌باشد که در میان برج‌های بلند مرتبه خیابان هرمزان در شهرک غرب واقع شده است. برای خشک‌اندازی این گود از روش حفر چاه زهکش، و برای پایدارسازی دیواره‌های گود از سیستم سازه نگهدارنده نیلینگ و شمع

1 Colijn

2 Potma

شکل ۳. ردیف شمع موجود در دیواره شمالی



Fig. 3. Cast in place concrete piles along the northern pit wall

برای مدلسازی شمع‌ها از یک دیوار دیافراگمی با مشخصات سازه‌ای معادل با ردیف شمع استفاده شده است. در نرم‌افزار PLAXIS2D با شرط $5 < \frac{L}{D} < 1.5$ (L: فاصله مرکز تا مرکز شمع‌ها و D: قطر شمع) مطابق شکل (۴) می‌توانیم از دیوار دیافراگمی معادل یک ردیف شمع استفاده کنیم. هر چه L/D بیشتر به سمت ۱ میل کند رفتار دیوار دیافراگمی معادل، واقعی‌تر خواهد بود [15].

شکل ۴. معادل سازی ردیف شمع با دیوار دیافراگم در مدلسازی عددی [۱۵]

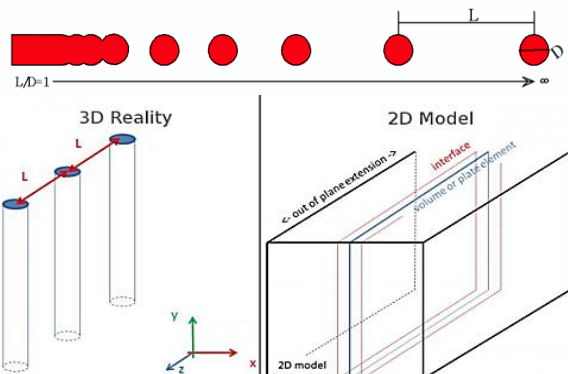


Fig. 4. Pile row equivalent diaphragm wall in modeling [15]

قطر شمع‌های استفاده شده در این پروژه یک متر و فاصله مرکز تا مرکز آنها سه متر، و در نتیجه مقدار $L/D=3$ در بازه مورد نظر قرار گرفته است.

برای معادل سازی باید مقاومت خمشی مقطع شمع‌های موجود (با چشم‌پوشی نظر از پدیده قوس زدگی^۳ بین شمع‌ها) را با مقاومت خمشی مقطع دیوار دیافراگمی برابر قرار دهیم و ضخامت مناسب دیوار را بدست آوریم.

مقاومت خمشی ردیف شمع:

$$EI_p = n \frac{E\pi R^4}{4} \quad (12)$$

مقاومت خمشی دیوار دیافراگمی:

است استفاده شده است [14]. محیط خاکی به ابعاد ۶۰ در ۴۰ متر با یک لایه شن رس‌دار همراه با ماسه (GC^1), روی یک لایه نفوذ ناپذیر سنگ بستر در نظر گرفته شده است. مشخصات خاک مطالعه شده، مطابق گزارش مطالعات ژئوتکنیکی پروژه [8], در جدول (۱) قابل مشاهده است.

جدول ۱. مشخصات لایه خاک در مدل عددی گودبرداری

Parameter	Property/Value
Material model	Hardening soil
Type of behavior	Drained
Soil unit weight below phreatic level (γ_{sat})	20 kN/m ³
Soil unit weight above phreatic level (γ_{drv})	19.25 kN/m ³
Horizontal permeability (k_x)	0.4 m/day
Vertical permeability (k_y)	0.4 m/day
Secant stiffness for CD triax(E_{50})	95000 kN/m ²
Tangent oedometer stiffness(E_{oed})	77410 kN/m ²
Unloading/reloading stiffness(E_{ur})	285000 kN/m ²
Reference stress (P_{ref})	100 kN/m ²
Poisson ratio (ν)	0.2
Cohesion (C_{ref})	10 kN/m ²
Friction angle (ϕ)	36°
Interface reduction factor (R_{int})	1
Compression ratio (C_u)	0.0068

Table 1. Material properties for numerical modeling of excavation

سطح آب در عمق ۹/۳ متری از سطح زمین قرار داشته و عملیات خشک‌اندازی به مدت ۲۰ روز قبل از عملیات گودبرداری انجام شده است. خشک‌اندازی از طریق یک ردیف چاه-نقطه زهکش به فاصله ۴ متر از لبه گود و فاصله طولی یک متر انجام شده است. به این ترتیب رفتار مصالح زهکشی شده می‌باشد.

دیواره شمالی گود به عمق ۲۵ متر در حالت بیشترین سربار (سربار قائم ۲۰۰ kN/m² به عرض ۳۰ متر) با استفاده از ۱۱ عدد شمع بتنی درجا مطابق شکل (۳) و ۸ ردیف مهار زمینی انکر^۲ پایدارسازی شده است.

1 Gravel Clay

2 Anchor

طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان مدول الاستیسیته یک کابل پیش تنیده با قطر متوسط ۱۲/۵ mm مقدار ۲۰۰ Gpa است. بر این اساس سختی محوری یک رشته کابل بصورت زیر محاسبه شده است.

$$EA = 200 * 10 * 10^9 * \pi * (0.006)^2 = 2.2 * 10^4 \text{ KN}$$

مقدار نیروی پیش‌تندگی انکرها با توجه به نوع انکر موجود در کارگاه و با استفاده از مقادیر واقعی تست‌های کشش در نرم‌افزار وارد شده است.

مقادیر سختی محوری و نیروی پیش‌تندگی برای انکرها در جدول (۳) و سختی محوری دوجاب (طول باند انکر) در جدول (۴) قابل مشاهده است.

جدول ۳. مشخصات مهارگره به گره (طول آزاد انکر)

Anchor type	Normal stiffness	Pre-stressed force
Six strands	132 MN	1370 KN
Five strands	110 MN	1141.6 KN
Four strands	88 MN	91.33 KN
Three strands	66 MN	68.5 KN

Table 3. Properties of the anchor rod (node to node anchor)

جدول ۴. مشخصات دوجاب تزریق شده (طول باند انکر)

Parameter	Property / Value
Normal stiffness per unit length (EA/L)	1E5 kN/m

Table 4. Properties of the grout per unit (anchor band length)

۵- تحلیل و آنالیز مدل

برای تحلیل مدل از ۲۰ فاز، شامل ۱۰ فاز اجرا (خاکبرداری) و ۱۰ فاز توقف (حفاری و اجرای نیل) در بازه‌های زمانی مشخص در دو حالت مورد مطالعه، مطابق جدول (۵) استفاده شده است.

با توجه به جدول مذکور در فاز شماره ۱ برای هر دو حالت، برای تعیین مقدار نشست ناشی از وزن ساختمان ۲۰ طبقه مجاور، بارگذاری به مقدار ۲۰۰ KN/m² و بدون زمان (نشست ساختمان تحت بار بهره‌برداری که در گذشته اتفاق افتاده است) اعمال شده است. تا در یک شرایط کاملاً مساوی از لحاظ سربار خارجی مقایسه بین دو حالت مورد مطالعه انجام شود. فازهای شماره ۲ و ۳ هر یک به مدت ۱۰ روز بوده و در این مدت در حالت خشک‌اندازی قبل از

$$EI_w = \frac{Ebd^3}{12} \quad (13)$$

n تعداد شمع‌ها، R شعاع یک شمع، d ضخامت دیوار و b طول کل دیوار معادل، مطابق شکل (۵) است.

با تساوی دو رابطه فوق داریم:

$$n \frac{E\pi R^4}{4} = \frac{Ebd^3}{12} \Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{3n\pi R^4}{b}} \quad (14)$$

Ip ممان اینرسی ردیف شمع حول محور افقی، Iw ممان اینرسی دیوار دیافراگمی حول محور افقی و E مدول الاستیسیته بتن مسلح که مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان مقدار متوسط ۲۰ GPa است.

شکل ۵. دیوار دیافراگمی معادل یک ردیف شمع

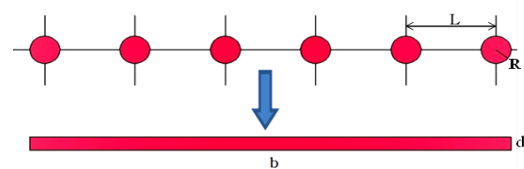


Fig. 5. Diaphragm wall equivalent to a pile row

در مقطع بررسی شده تعداد ۱۱ شمع به شعاع ۰/۵ متر و فاصله مرکز به مرکز ۳ متر وجود دارد که براساس رابطه (۱۴) مقدار ضخامت دیوار دیافراگمی معادل آن ۶۰ cm بدست می‌آید.

در ادامه سختی خمشی و سختی محوری در واحد طول دیوار محاسبه شده است.

$$EI_w = 0.36 * 10^6 \text{ (سختی خمشی)}$$

$$EA_w = 12 * 10^6 \text{ (سختی محوری)}$$

مشخصات دیوار دیافراگمی معادل در جدول (۲) قابل مشاهده است. برای ایجاد طول آزاد انکرها از مهارگره به گره استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات دیوار دیافراگمی معادل

parameter	Property / Value
Normal stiffness per unit (EA/L)	1.2E7 kN/m
Total normal stiffness (EA)*	3.6E8 kN
Flexural rigidity per unit (EI/L)	3.6E5 kNm ² /m
flexural rigidity (EI) Total	10.08E6 kNm ²
Equivalent thickness (d)	0.6 m
Weight (w)	15 kN/m/m
Poisson ratio (v)**	0.1

Table 2. Properties of the diaphragm wall (plate)

* طول کل دیوار ۳۰ متر است.

** با توجه به مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، ضریب پواسون بتن آرمه معمولی در حدود ۰/۱ فرض شده است.

در حالت خشک‌اندازی هم‌زمان با گودبرداری تا رسیدن عمق گود به تراز ۱۰- هیچ گونه آبی پمپاژ نشده و فقط عملیات گودبرداری انجام می‌شود و از فاز شماره ۱۱ در پایان ماه سوم از شروع پروژه، خشک‌اندازی متناسب با عمق گود ادامه پیدا کرده است. تحلیل انجام شده روی بحرانی‌ترین مقطع (A-A در شکل‌های ۲ و ۶) در اینجا آورده شده است.

گودبرداری عملیات خشک‌اندازی برای رساندن سطح آب به تراز ۲۷- (دو متر پایین تر از کف گود) به مقدار ثابت $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$ انجام شده است. در فازهای شماره ۲ و ۳ در حالت خشک‌اندازی هم‌زمان با گودبرداری برای معادل‌سازی دو حالت به لحاظ زمانی، هیچ گونه عملیاتی انجام نشده است و تنها مدل بار دیگر در زمان تعیین شده اجرا شده است. در سایر فازها در حالت خشک‌اندازی قبل از گودبرداری مقدار پمپاژ از چاه‌ها به مقدار ثابت ادامه پیدا کرده است تا سطح آب در حالت پایدار باقی بماند.

جدول ۵. فازهای تعریف شده جهت تحلیل در دو حالت مورد مطالعه

Phases number	Phase duration (day)	Time from beginning of the project (day)	Processes in state of dewatering before excavation (what is done in this project)	Processes in state of simultaneous dewatering- excavation (New suggested method)
1	—	—	Loading without time	Loading without time
2	10	10	Start pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$ in order to reduce water table to level -27	Stop operating to equivalence dewatering time in suggested model
3	10	20		
4	10	30	Concrete piling , constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Concrete piling , without pumping
5	10	40	Stop operating, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Stop operating to equivalence dewatering time
6	10	50	Excavation to -3m from ground surface, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Excavation to -3m from ground surface, without pumping
7	10	60	Stop operating, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Stop operating to equivalence dewatering time
8	10	70	Excavation to -6m from ground surface, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Excavation to -6m from ground surface, without pumping
9	10	80	Stop operating, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Stop operating to equivalence dewatering time
10	10	90	Excavation to -9m from ground surface, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Excavation to -9m from ground surface, without pumping
11	10	100	Stop operating, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Stop operating, Start pumping of wells $2 \text{ m}^3/\text{day}$ in order to reduce water table to level -12
12	10	110	Excavation to -12m from ground surface, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Excavation to -12m from ground surface, constant pumping of wells $2 \text{ m}^3/\text{day}$
13	8	118	Stop operating, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Stop operating, pumping of wells $3.9 \text{ m}^3/\text{day}$ in order to reduce water table to level -15
14	3	121	Excavation to -15m from ground surface, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Excavation to -15m from ground surface, constant pumping of wells $3.9 \text{ m}^3/\text{day}$
15	10	131	Stop operating, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Stop operating, pumping of wells $4.6 \text{ m}^3/\text{day}$ in order to reduce water table to level -18
16	10	141	Excavation to -18m from ground surface, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Excavation to -18m from ground surface, constant pumping of wells $4.6 \text{ m}^3/\text{day}$
17	28	169	Stop operating, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Stop operating, pumping of wells $5.5 \text{ m}^3/\text{day}$ in order to reduce water table to level -21
18	4	173	Excavation to -21m from ground surface, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Excavation to -21m from ground surface, constant pumping of wells $5.5 \text{ m}^3/\text{day}$
19	10	183	Stop operating, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Stop operating, pumping of wells $7.9 \text{ m}^3/\text{day}$ in order to reduce water table to level -25
20	12	195	Excavation to -25m from ground surface, constant pumping of wells $8.2 \text{ m}^3/\text{day}$	Excavation to -25m from ground surface, constant pumping of wells $7.9 \text{ m}^3/\text{day}$

Table 5. The modeling phases according to the real operation and suggested one

شکل ۶. موقعیت دیواره شمالی، مقطع A-A و نقطه R₂

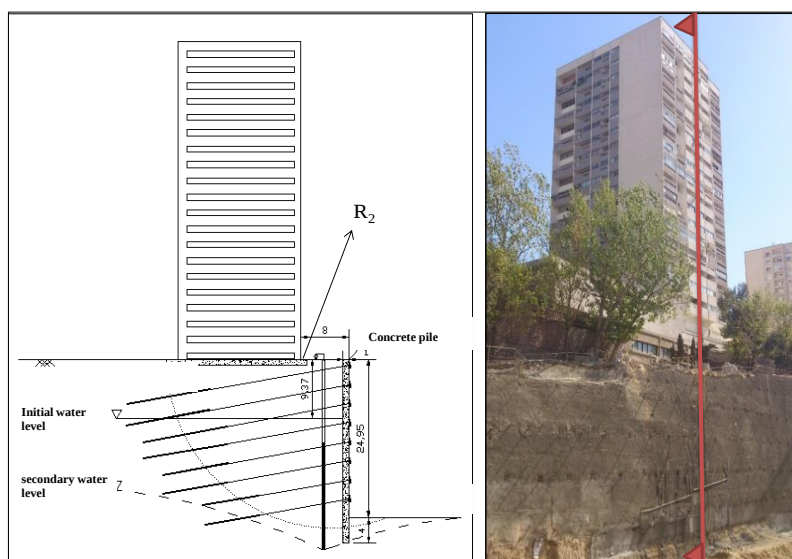


Fig. 6. Norther wall of excavation pit, cross-section A-A and point R2

شکل‌های (۷ و ۸) نشان دهنده کانتورهای جابه‌جایی قائم مقطع A-A در انتهای پروژه به ترتیب در حالت خشک‌اندازی قبل از گودبرداری و خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری است. مطابق شکل (۷) در حالت اول مقدار نشست ماکزیمم در پایان گودبرداری ۷۹/۱۶ میلی‌متر بوده در حالی که مطابق شکل (۸) در حالت دوم مقدار نشست ماکزیمم در پایان گودبرداری ۷۳/۵۴ میلی‌متر است که نشان دهنده کاهش ۵/۶۲ میلی‌متر در نشست کل پشت دیواره است.

۶- فواید روش خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری

روش خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری دارای فواید زیادی از قبیل کاهش مقدار نشست کل در پشت دیواره، کاهش مقدار آب پمپاژ شده از زمین، کاهش نشست نامتقارن پی مجاور و کاهش زمان و هزینه عملیات خشک‌اندازی و است که در ادامه به توضیح این موارد پرداخته شده است.

۶-۱- کاهش نشست حاشیه گود

از عوامل مهم نشست در یک لایه خاک ضخامت زهکشی شده آن است. باتوجه به این‌که ضخامت زهکشی شده لایه خاک در فازهای اجرا برای حالت خشک‌اندازی قبل از گودبرداری بیشتر از

شکل ۷. جابه‌جایی قائم در انتهای پروژه در حالت خشک‌اندازی قبل از گودبرداری

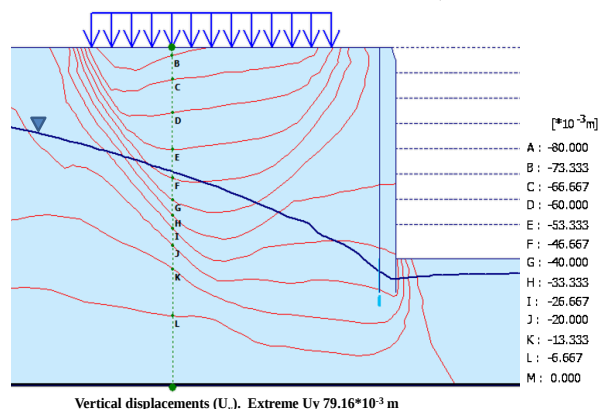


Fig. 7. Vertical settlement at the end of project in state of dewatering before excavation

شکل ۸. جابه‌جایی قائم در انتهای پروژه در حالت خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری

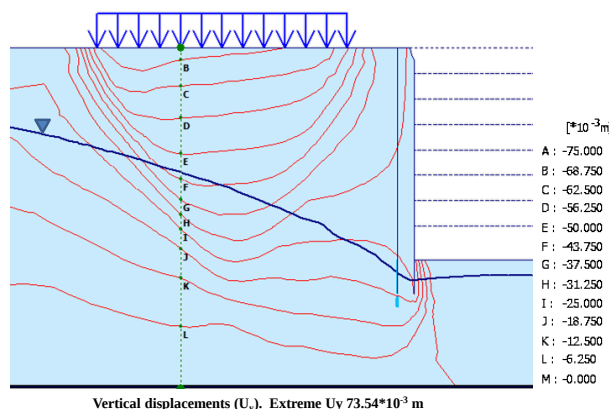


Fig. 8. Vertical settlement at the end of project in state of simultaneous dewatering and excavation

سه حالت خشک، خشک‌اندازی قبل از گودبرداری و خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری است. در شکل (۹) قسمت‌هایی که شیب منحنی‌ها در آن کمتر است (به عبارت دیگر گرادین مؤلفه قائم جابه‌جایی بیشتر شده است) مربوط به فازهای خشک‌اندازی و قسمت‌های با شیب بیشتر (گرادین مؤلفه قائم جابه‌جایی کمتر) مربوط به فازهای گودبرداری است.

شکل ۹. منحنی‌های تغییر مکان قائم نقطه R2 نسبت به زمان برای سه حالت

بدون خشک‌اندازی، خشک‌اندازی همزمان و قبل از گودبرداری

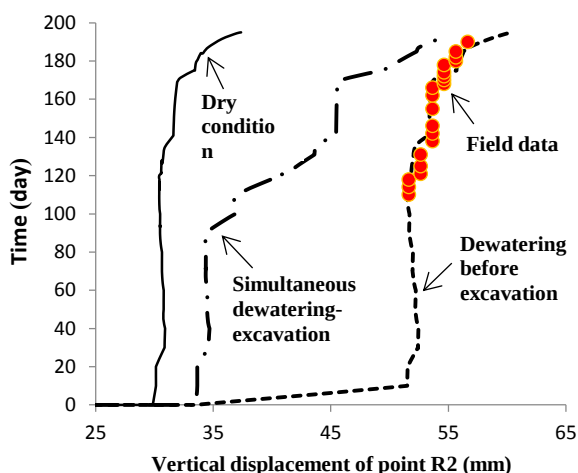


Fig. 9. Vertical displacement of R2 point for three state of site dry condition, dewatering before excavation and simultaneous dewatering excavation.

همانگونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، در حالت خشک‌اندازی قبل از گودبرداری مقادیر نشست در اولین فاز پس از خشک‌اندازی به شدت رشد داشته و سپس در فازهای گودبرداری کند می‌شود ولی در حالت خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری نشست ناشی از خشک‌اندازی در بین فازهای گودبرداری پخش شده بطوری که مجموع نشست فازها در این حالت از حالت خشک‌اندازی قبل از گودبرداری کمتر شده است. در حالت خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری نشست کل به میزان ۵ میلی متر کاهش یافته است. با توجه به این که مقدار نشست ناشی از خشک‌اندازی ۲۳ و نشست کل ۶۰ میلی متر است، پس می‌توان گفت که روش خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری می‌تواند حدود ۲۰ درصد نشست ناشی از خشک‌اندازی و ۹ درصد نشست کل را کاهش دهد.

۶-۲- کاهش حجم آب پمپاژ شده

همانگونه که در جدول (۵) مشاهده شد مقادیر پمپاژ از چاه‌ها در تمامی فازهای تحلیل در دو حالت خشک‌اندازی قبل از گودبرداری و

حالت خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری است (به دلیل این که در حالت اول تمام لایه در تمام مدت گودبرداری زهکشی شده است ولی در حالت دوم این مقدار به مرور با افزایش عمق گود افزایش می‌یابد) مقدار نشست آن نیز بیشتر است. از طرفی مدت زمانی که به لایه زهکشی شده برای تراکم و تحکیم در حالت خشک‌اندازی قبل از گودبرداری داده می‌شود بیشتر از این زمان در حالت خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری است که این موضوع باعث تشدید نشست در حالت اول نسبت به حالت دوم می‌شود. در گزارش دریافتی از شرکت مجری طرح، داده‌های مربوط به قرائت ۴۵ نقطه در قسمت‌های مختلف حاشیه و دیواره‌های گود، از تاریخ ۹۳/۴/۱۴ تا ۹۳/۷/۱ موجود بود که از این میان قرائت مربوط به نقطه R2 (نقطه بحرانی انتخاب شده برای تعیین نشست) به شرح جدول (۶) است.

جدول ۶. داده‌های حاصل از پایش نقطه R2

Time from 2014/7/5 (day)	Total time from beginning of the project (day)	Excavation level below the monitoring point (m)	Total settlement from beginning of the project (mm)	Excavation induced settlement (mm)
0	110	-12	51.65	0
4	114	-12	51.65	0
8	118	-12	51.65	0
11	121	-15	52.65	1
15	125	-15	52.65	1
21	131	-15	52.65	1
28	138	-18	53.65	2
32	142	-18	53.65	2
36	146	-18	53.65	2
45	155	-18	53.65	2
52	162	-18	53.65	2
56	166	-18	53.65	2
58	168	-21	54.65	3
60	170	-21	54.65	3
62	172	-21	54.65	3
64	174	-21	54.65	3
68	178	-21	54.65	3
70	180	-23	55.65	4
72	182	-23	55.65	4
75	185	-23	55.65	4
80	190	-25	56.65	5

Table 6. Field data from key monitoring point R2

* آغاز پروژه اولین روز شروع حفاری چاه‌های خشک‌اندازی است.

موقعیت دیواره شمالی و همچنین وضعیت مقطع A-A و نقطه R2 در شکل‌های (۲ و ۶) قابل مشاهده است. شکل (۹) نشان دهنده تغییرات نشست نقطه R2 در مقابل زمان از شروع گودبرداری، برای

نامتقارن در آن شده است. می‌توان با استفاده از خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری عدم تقارن نشست آن را به میزان ۲۲/۴۴ درصد کاهش داد که در ادامه به توضیح این مورد پرداخته شده است.

شکل (۱۱) موقعیت ۱۳ نقطه انتخاب شده برای محاسبه و مقایسه نشست‌ها در سایت و مدل نرم‌افزار را نشان می‌دهد. فواصل نقاط از هم ۲/۵ متر و فاصله اولین نقطه از لبه گود ۸ متر است.

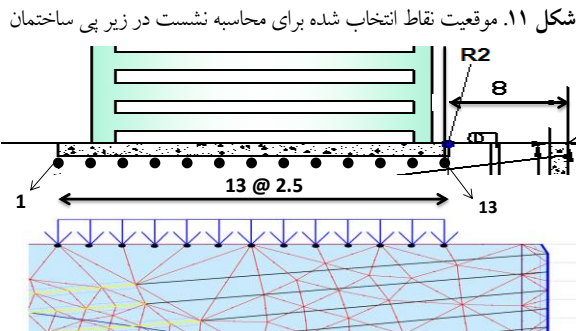


Fig. 11. Selected points under the adjacent foundation

برای محاسبه میزان عدم تقارن نشست زیر پی، از شاخص پراکندگی واریانس مطابق رابطه (۱۵) استفاده شده است.

$$var_p = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2}{N} \quad (15)$$

var_p واریانس، μ_x میانگین، x_i مقادیر نشست و N تعداد نقاط است. برای تعیین میزان عدم تقارن در دو حالت خشک‌اندازی، ابتدا واریانس مقادیر نشست در شرایط کاملاً خشک به عنوان حد مجاز پراکندگی محاسبه شده و با تعیین میزان اختلاف واریانس از حد مجاز در دو حالت خشک‌اندازی، به مقایسه آنها پرداخته شده است. شکل (۱۲) نشان دهنده مقادیر نشست ایجاد شده در پایان گودبرداری در ۱۳ نقطه انتخابی زیر پی مجاور برای حالت کاملاً خشک بوده و واریانس مقادیر نشست نشان داده شده در این شکل ۱۴/۴۹ است.

شکل ۱۲. نمودار نشست زیر پی پس از گودبرداری در حالت خشک

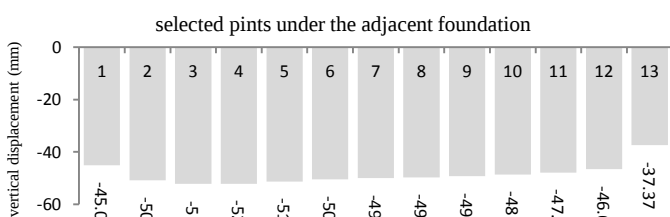


Fig. 12. Vertical displacement in site without water

خشک‌اندازی همزمان با گودبرداری با استفاده از نرم‌افزار تعیین شده است.

شکل (۱۰) نرخ پمپاژ از چاه‌ها را برای هر دو حالت تا پایان گودبرداری نشان می‌دهد. همانگونه که می‌دانیم سطح زیر منحنی دبی بر حسب زمان، مقدار حجم آب خروجی از زمین را به ما می‌دهد. سطح زیر منحنی در حالت خشک‌اندازی قبل از گودبرداری مقدار ۱۵۹۹ متر مکعب بر واحد طول و سطح زیر منحنی در حالت خشک-اندازی همزمان با گودبرداری مقدار ۵۱۰۳ متر مکعب بر واحد طول است که نشان دهنده کاهش ۶۸ درصدی حجم آب پمپاژ شده از چاه‌ها تا پایان مرحله گودبرداری است.

شکل ۱۰. نرخ پمپاژ از چاه‌ها برای دو حالت خشک‌اندازی

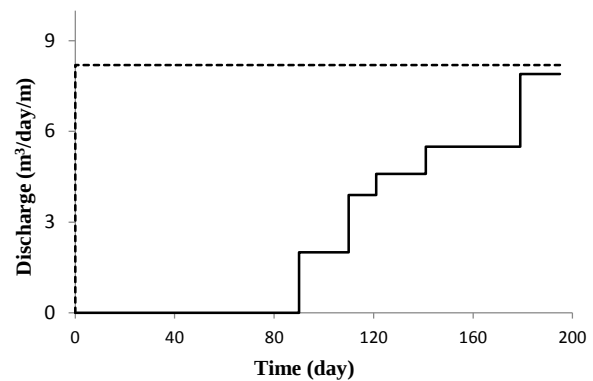


Fig. 10. Discharge rate for two state of dewatering (dash line: one step dewatering, solid line: step by step dewatering)

۳-۶- کاهش نشست نامتقارن پی مجاور

بطور کلی می‌توان گفت که تمامی ساختمان‌هایی که روی یک بستر خاکی ساخته می‌شوند، نشست در زیر پی آنها اتفاق افتاده است یا در آینده اتفاق خواهد افتاد ولی این مقدار نشست یا آنچنان کم و ناچیز است که اصلاً قابل ملاحظه نیست یا کاملاً متقارن است که هیچ‌گونه مشکلی سازه‌ای ایجاد نمی‌کند.

اگر نشست ایجاد شده در بستر یک ساختمان به صورت نامتقارن خود را نشان دهد ممکن است مشکلات زیادی را بوجود آورد.

یکی از عوامل ایجاد نشست نامتقارن در ساختمان‌ها، گودبرداری در مجاورت آنها و البته بحث خشک‌اندازی در زمین‌هایی با سطح بالای آب زیرزمینی است.

مطابق شکل (۶) در مقطع A-A، برجی بیست طبقه قرار دارد که با توجه به مدل عددی، گودبرداری و خشک‌اندازی باعث ایجاد نشست

شکل ۱۵. تغییر شکل دیواره و خاک پشت آن در اثر گودبرداری [16].

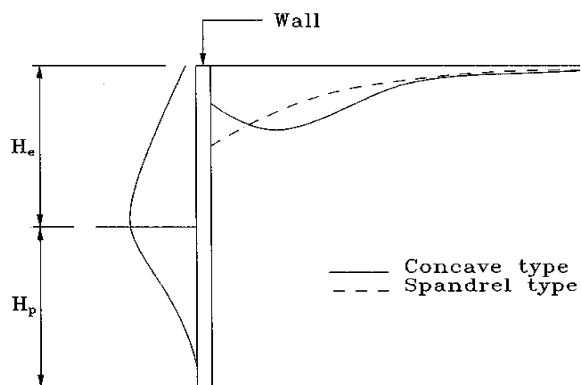


Fig. 15. Wall deformation after excavation [16]

در مجموع می‌توان گفت با استفاده از خشکاندازی همزمان با گودبرداری می‌توان نشست نامتقارن پی را به میزان ۲۲/۴۴ درصد کاهش داد. کاهش عدم تقارن نشست در حالت خشکاندازی همزمان با گودبرداری در شکل (۱۶) نیز قابل مشاهده است.

شکل ۱۶. نشست زیر پی پس از گودبرداری در سه حالت خشک، خشکاندازی همزمان و قبل از گودبرداری

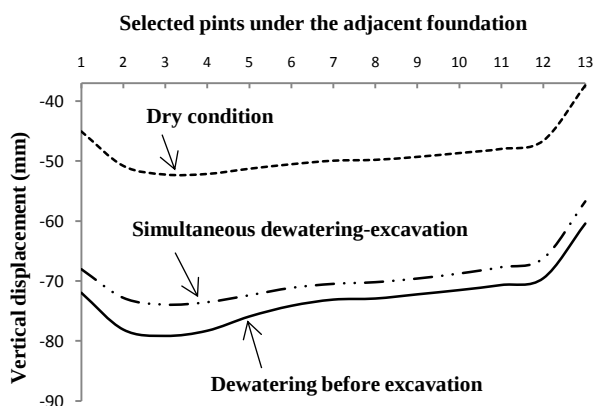


Fig. 16. Vertical displacement under adjacent foundation in three state of without water, dewatering before excavation and dewatering coinciding excavation

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

عملیات خشکاندازی برای اهداف ساختمان سازی، منجر به نشست زمین در مناطق اطراف کارگاه شده که با وارد شدن خسارت به ساختمان‌های موجود نیز ممکن است همراه باشد. اگر چه خسارت ناشی از نشست ممکن است بسیار اندک باشد، لیکن پیامدهای بالقوه موضوع به ویژه در ارتباط با ادعاهای اشخاص ثالث ایجاب می‌کند که پیمانکاران همواره به آن توجه کافی داشته باشند.

شکل‌های (۱۳ و ۱۴) نشان دهنده مقادیر نشست ایجاد شده در پایان گودبرداری در نقاط انتخابی برای حالت خشکاندازی قبل از گودبرداری و خشکاندازی همزمان با گودبرداری است. واریانس مقادیر نشست در این دو حالت به ترتیب ۲۱/۶۴ و ۱۸/۳۹ بوده که اختلاف از حد مجاز به ترتیب ۴۹/۲۸ درصد و ۲۶/۸۴ درصد است.

شکل و بزرگی نشست ناشی از گودبرداری در پشت دیواره بسته به نوع خاک و تغییر مکان افقی دیواره متغیر بوده و مطابق شکل (۱۵) به دو صورت محدب و مقعر است. حالت محدب معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که: ۱- سازه نگهدارنده مهاربندی نشده باشد و ۲- بیشترین حرکت افقی خاک در قسمت بالایی دیواره حایل اتفاق افتد. حالت مقعر یا قاشقی زمانی اتفاق می‌افتد که دیواره مهاربندی شده باشد و بیشترین حرکت افقی آن در نزدیکی کف گود اتفاق افتد [16].

با این توضیح و با توجه به این که دیواره گود مورد بررسی از نوع مهاربندی شده است پس می‌توان انتظار ایجاد الگوی قاشقی نشست را داشت که البته این موضوع از نتایج خروجی از نرم‌افزار در شکل‌های (۷ و ۸) نیز مشهود است.

شکل ۱۳. نمودار نشست زیر پی در حالت خشکاندازی قبل از گودبرداری

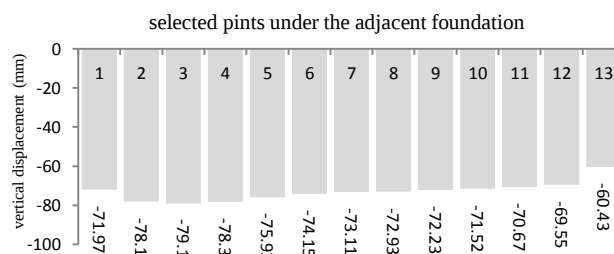


Fig. 13. Vertical displacement in dewatering before excavation

شکل ۱۴. نمودار نشست زیر پی در حالت خشکاندازی همزمان با گودبرداری

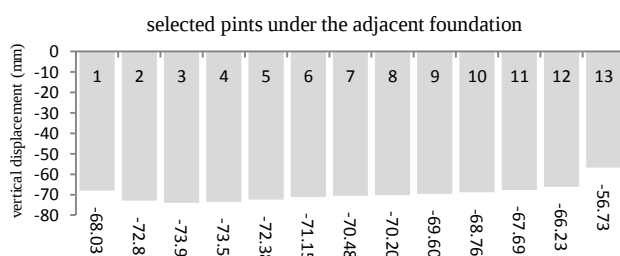


fig. 14. Vertical displacement in dewatering coinciding excavation

- [3] Shahbazi M., Ghafoori M. & Lashkaripoor G. 2010 Investigation of leakage and groundwater modeling at N7 and W7 stations of Line 7 of Tehran Metro. *Fourteenth Iranian Geological Society Conference and Twenty eighth Earth Science Congress*, Orumiye University. (In Persian)
- [4] Zhou N., Pieter A., Rongxiang L., Yiqun T. & Simin J. 2010 Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land settlement. *Journal of Engineering Geology*. Vol. 114, p. 251-260.
- [5] Budhu M. and Adiyaman I. B. 2010 Mechanics of land settlement due to groundwater pumping. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 34, pp. 1459-1478, DOI: 10.1002/nag.863
- [6] Zu L. and Feng Z. 2011 Finite element numerical simulation of land subsidence and groundwater exploitation based on visco-elastic-pelastict biots consolidation theory. *Journal of hydrodynamics*, 23(5):615-624.
- [7] Budihardjo M. A., Yang S., Chegenizadeh A. & Nikraz H. 2015 Footing under static loading: land subsidence. *American Journal of Applied Sciences*, pp. 58-63, DOI: 10.3844/ajassp.2015.58.63
- [8] Khosravi M. 2016 Numerical simulation of ground settlement due to groundwater pumping in the vicinity of the deep foundation pits. *Master thesis*, Shahid Beheshti University. (In Persian)
- [9] Terzaghi K. and Peck R.B. 1948 Soil Mechanics in Engineering Practice. First Edition, John Wiley and Sons, New York.
- [10] Doulatyari H. 2015 Survey the land subsidence due to decrease the groundwater level and providing a suitable strategy for dealing with it. (Case Study of Tehran Plain). *Master thesis*, Shahid Beheshti University. (In Persian)
- [11] Colijn P. J. & Potma J. 1944 Weg-en waterbouwkunde. I. Grondmechanica. Kosmos, Amsterdam.
- [12] Ghasemzadeh H., 2010 Seepage Modeling in Saturated and Unsaturated soil with SEEP/W and VADOSE/W. ISBN: 978-864-8703-75-7. (In Persian)
- [13] Brinkgreve R.B.J. 2004 Plaxis user's manual- version 8.6. *Delft University of Technology and PLAXIS b.v*, The Netherlands, ISBN 905895088.
- [14] Schanz T., Vermeer P.A. & Bonnier P.G 1999 The hardening soil model: formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Rotterdam.
- [15] Sluis J.J.M. 2012 Validation of embedded pile row in PLAXIS 2D, MSc Thesis, *Delft University of Technology*, Delft, Netherlands.
- [16] Ou C.Y., Hsieh P.G. & Chiou D.C. 1998 Characteristics of ground surface settlement during excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No. 5, pp. 758-767.

راهکار عملی ارائه شده در این پژوهش، استفاده از روش خشکاندازی همزمان با گودبرداری بوسیله تنظیم پمپاژ از چاه‌های زهکش است. روش مذکور در این پژوهش بر تخمین زمان‌های توقف و اجرا و تنظیم مقادیر پمپاژ بر اساس تراز سطح آب مورد انتظار، با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS2D استوار است.

نتایج نشان می‌دهد که:

- روش عددی المان محدود راه حل مناسبی برای این منظور بوده و می‌تواند تخمین قابل قبولی از مقادیر پمپاژ در زمان‌های مختلف گودبرداری برای تنزل سطح آب متناسب با تراز ارتفاعی کف گود در مراحل مختلف ارائه دهد.
- استفاده از روش خشکاندازی همزمان با گودبرداری برای یک مطالعه موردی در منطقه ۲ تهران، به ترتیب کاهش ۲۰ و ۹ درصدی در نشست ناشی از خشکاندازی و نشست کل در طی عملیات گودبرداری را نشان می‌دهد. با توجه به این که طراحی سازه نگهدارنده گود در مجاورت ساختمان‌های بلندمرتبه و حساس، بر اساس کنترل تغییر مکان‌ها صورت می‌گیرد این موضوع می‌تواند تاثیر بسزایی در هزینه‌های طرح داشته باشد.
- روش خشکاندازی همزمان با گودبرداری دارای فوایدی از قبیل کاهش حدود ۶۸ درصدی مقدار آب خروجی از زمین تا پایان مرحله گودبرداری، کاهش حدود ۲۲ درصدی نشست نامتقارن پی مجاور و کاهش زمان و هزینه عملیات خشکاندازی در پروژه مذکور بوده است.

References

۸- مراجع

- [1] Mirasi M., Rahnama H., Binesh M. & Elyasi M. 2011 Geotechnical survey of land subsidence due to underground water pumping and extreme development. *First National Conference on Civil and Development*, Zibakenar, Iran, COI: OMRANTOSE- E01- 408. (In Persian)
- [2] Powers J. P., 2007 Construction dewatering: a guide to theory and practice. Third Edition, p. 64-120, *John Wiley and Sons, Australia*.

Development and Investigation of a Simultaneous Dewatering – Excavation Method for Reducing the Settlement in the Vicinity of Construction Pit

Mahdi Khosravi¹, Seyed Hossein Ghoreishi Najafabadi², Mohammad Hossein Khosravi^{3*}

1- Graduated MSc., Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University

2- Assistant Prof., Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University

3- Assistant Prof., School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran

*mh.khosravi@ut.ac.ir (Corresponding author)

Abstract:

Steady population growth resulted in increasing the land prices which lead to construction of deep excavation. Therefore the use of underground spaces is economically acceptable. One of the most important issues in the design of underground spaces and deep foundation pits is the existence of groundwater and how to control it. The influence of groundwater on a structural project can be very extensive and it may affect the structural design, performance and the total cost of the project significantly. Many problems related to ground water have been observed in excavation sites recently. Those problems have made significant delays in construction process and sometimes lead to significant re-design of the entire operation process. Considering the negative influence of groundwater on the reinforcement system, (e.g. nailing and anchoring) as well as the difficulty of excavation process under wet condition, water must be pumped out from the excavation area. The process of ground water discharge from the construction area which results in lowering the ground water level in that area is called dewatering. Dewatering operation may lead to ground settlement in the vicinity of construction pit which may damage the building. Although the damage due to ground settlement may be negligible, the potential consequences, especially in connection with claims of third parties, requires sufficient attention. In recent years, dewatering and lowering groundwater levels along deep foundation pits subway tunnels in urban environments caused some significant ground subsidence. The mechanism of this type of ground subsidence is that due to water drainage from the soil layers, the hydraulic pressure decreases leading to an increase in the density of the soil and therefore, ground settlement. Dewatering can leads to ground subsidence in different ways where some of them are as: a) removing the finer soil particles from the ground during water pumpage due to a poor pumping performance, b) in the case of dewatering by pumping water from the floor of excavation pit, piping and boiling can reduce the soil strength properties, leading to a failure in the soil mass and c) compaction of the compressible soils or crushable sandy soils due to increasing the effective stress. Some methods such as cut off walls and artificial injection can be used to reduce the ground settlement due to dewatering, but these methods are very time consuming and costly. Furthermore, methods such as artificial injection may have low efficiency and cause environmental effects. Therefore providing a new technique for reducing the dewatering induced ground settlement in less time and cost is necessary. The strategy proposed in this study is to apply a step by step dewatering method, by setting pumping from drainage wells, coincides with the excavation process. For this purpose the PLAXIS2D software is employed as a finite element method to model the settlement due to dewatering. This operation could be applied by modeling two deep foundation pits with the same structures and different groundwater conditions. The proposed step by step method was modeled in this software by estimating the excavation time and coinciding it with water pumping. Step by step dewatering method has some advantages such as reducing the amount of settlement behind the wall and asymmetric ground settlement under adjacent foundation, reducing the amount of water pumping out of the ground, decreasing the Mohr-Coulomb full plastic points in the range of geogrids and reducing the time and cost of dewatering.

Keywords: Groundwater, Excavation, Dewatering, Ground settlement, PLAXIS2D