

Effect of clay layers on land subsidence and subsidence recovery with aquifer recharge

Lida Mottaghi *¹, Ali Beitollahi¹, Jaber Mamaghanian²

¹ Department of Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

² Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Review History:

Received: Nov. 14, 2023

Revised: Nov. 25, 2024

Accepted: Apr. 02, 2025

Available Online: Jul. 15, 2025

Keywords:

Land Subsidence

Groundwater Level Drop

Artificial Recharge

Numerical Model

Unsaturated Soil

ABSTRACT: The aim of this study is to investigate the effect of clay zones on land subsidence due to groundwater overexploitation, and also to investigate the effect of clay zones on the recovery percentage of subsidence from artificial recharge. The finite element model has been used on aquifers with different placement positions of clay zones. In each aquifer, the water level gradually drops and the subsidence of the land is calculated, then in a certain period, the water level gradually returns to its primary level and finally the recovery percentage of the subsidence is evaluated. The results show that a percentage of the subsidence can be recovered with artificial recharge, and this amount varies depending on the aquifer materials, the thickness, and the location of the clay zones. Land subsidence in the sand-only aquifer is less than that of the sandy aquifers with clay zones, and about 90% of the subsidence caused in the sand-only aquifer can be recovered. The presence of clay zones increases land subsidence. In sandy aquifers with clay zones, depending on the position and thickness of the clay zones, approximately 19 to 46% of the created subsidence can be recovered. The time of groundwater level drop is more effective in the subsidence of sandy aquifers with clay zones, where clay zones are located at shallower depths. In these types of aquifers, with the increasing time of groundwater level drop, the land subsidence increased, and also the recovery percentage of subsidence by artificial recharge decreased by 13% on average.

1- Introduction

Land subsidence (LS) is the downward movement of the ground surface due to changes in soil stress. There are many reasons for land subsidence, one of which is the excessive exploitation of groundwater. In extensive studies, LS has been evaluated from various perspectives to develop solutions for mitigating its occurrence and associated challenges. Several studies such as refs [1-3], have used field and satellite measurements and monitoring to assess subsidence, while others have investigated it through numerical modeling, such as Budihardjo et al., [4] who investigated the effect of the clay layers, their different placement patterns, the thickness of clay layers in land subsidence, in which the water level drop due to water extraction from the pump was considered. Bodhu et al., [5] investigated the effect of the clay layers in land subsidence due to water level drop and artificial recharge only in one case, while clay zones may have different states. Therefore, in this study, the effect of the clay layers and their different placement patterns in the subsidence of the land due to water level drop in different situations was investigated, as well as the recovery percentage of subsidence due to artificial recharge and the effect of the duration of the water level drop on subsidence recovery were evaluated.

2- Methodology

In this research, Plaxis 2D finite element software was used to model and estimate the land subsidence due to the drop in the groundwater level. To investigate the aims of this paper, sandy aquifers with different states of clay zones are considered. In each aquifer, the water level gradually drops, and the subsidence of the land is calculated, then in a certain period, the water level gradually returns to its primary level, and finally, the recovery percentage of the subsidence is evaluated. Therefore, different states and scenarios have been considered for the analysis of the models, in all cases, it was assumed that the initial water level was 20 m below the ground surface. The considered states and scenarios were based on

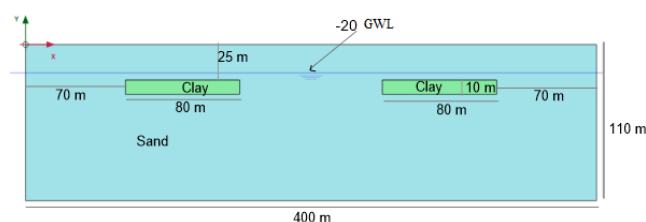


Fig. 1. The geometry of the model

*Corresponding author's email: Lida.mottaghi@yahoo.com



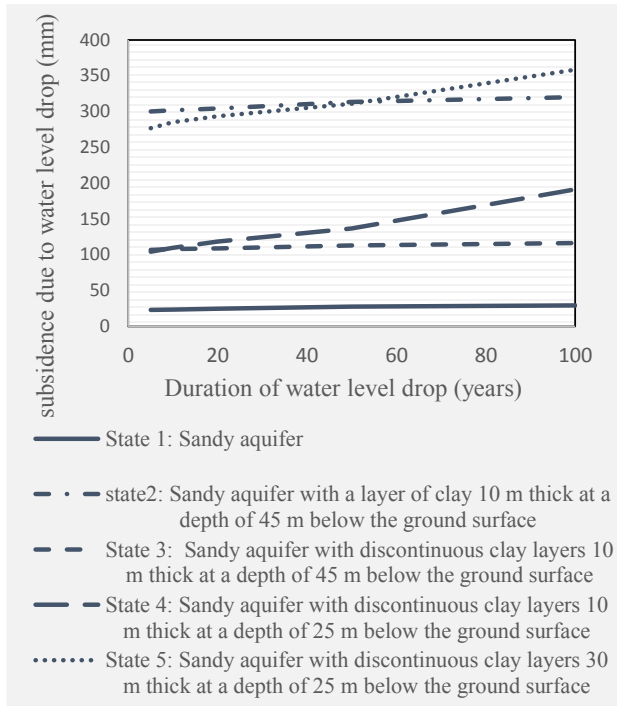


Fig. 2. Comparison of the amount of subsidence between different states.

examining the effect of discontinuous and continuous clay layers, clay layers at greater depths and clay layers close to the ground surface, as well as the thickness of the clay layer, on subsidence rates and artificial recharge.

State 1: Sandy aquifer. State 2: Sandy aquifer with a layer of clay 10 meters thick at a depth of 45 meters below the ground surface. State 3: Sandy aquifer with discontinuous clay layers 10 meters thick at a depth of 45 meters below the ground surface. State 4: Sandy aquifer with discontinuous clay layers 10 meters thick at a depth of 25 meters below the ground surface. State 5: Sandy aquifer with discontinuous clay layers 30 meters thick at a depth of 25 meters below the ground surface.

3- Discussion and Results

Figure 2 shows a comparison of the amount of subsidence in the different states, as well as the effect of the time of water level drop on subsidence.

According to Figure 2, it can be said:

- Due to the fact that clay soils have high plasticity compared to sandy soils, therefore, with a drop in the water level, the LS in aquifers with clay zones is more than the LS of sandy aquifers.
- LS in aquifers with continuous clay zones is more than in aquifers with discontinuous clay zones (comparison of the state 2 and the state 3)
- The closer the clay zones are to the ground surface, the more effective stress changes. Therefore, when the clay

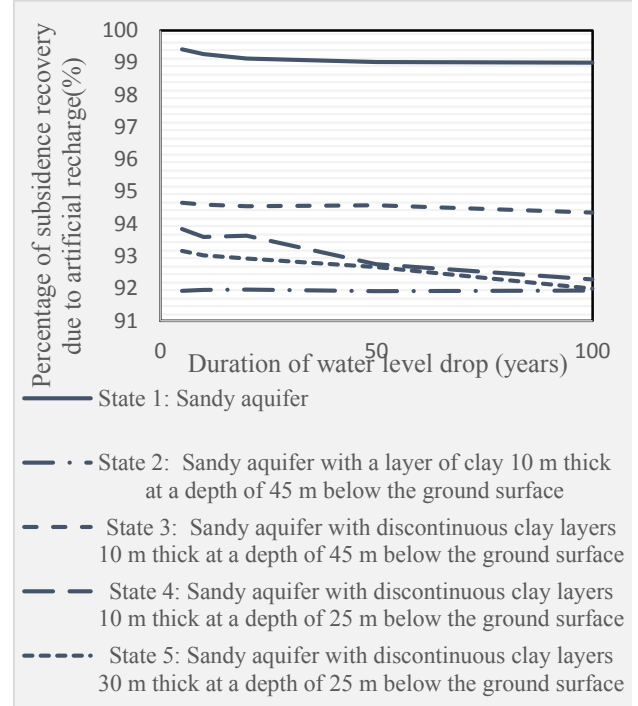


Fig. 3. Comparison of subsidence recovery between different states due to artificial recharge.

zones are placed at a lower depth, the subsidence is more than when the clay zones are placed at a greater depth (comparison of the 3 and 4 states).

- Due to the fact that clay zones have high plasticity and compressibility, the more the thickness of the clay layer increases, the amount of LS increases. (Comparison of the state 4 and the state 5).
- As the time of water level drops is more, the more time it takes for drainage, and the LS increases. Time is more effective in the subsidence of sand aquifers with clay zones that are located at a lower depth. For example, in state 4, with the increase in the water level drop time from 5 years to 100 years, the subsidence has increased from 104.2 mm to 191.3 mm.

In Figure 3, the amount of subsidence recovery due to artificial recharge is compared between different states, as well as the effect of the water level drop time on the amount of subsidence recovery is evaluated.

According to Figure 3, it can be said:

- In sand aquifers, due to the granular structure of the soil, consolidation subsidence is less, on the other hand, there are fewer changes in the porosity of sandy soils compared to clay soils. Therefore, recovery of subsidence in sandy soils becomes easier with artificial recharge. In this study, with artificial recharge in sandy aquifers, almost 90% of the LS can be recovered, but the clay zones cause the percentage of subsidence recovery to decrease. In this study, due to the different positions of the clay zones in

the aquifers 19 to 46% of the created subsidence can be recovered.

- As the time of water level drop increases, the subsidence recovery percentage often decreases or remains almost constant. In sandy aquifers with clay zones that are located at a lower depth (states 4 and 5), increasing the time of water level drop causes an average 13% decrease in subsidence recovery with artificial recharge. For example, in state 4, in 5 years and 100 years of water level drop, 38.4% and 22.79% of the LS is recovered, respectively, that is, with the increase of time from 5 years to 100 years, the recovery of the LS is reduced by 15.6%.

4- Conclusions

In this study, a sandy aquifer and sandy aquifers with clay zones are modeled in the Plaxis 2D finite element software. Land subsidence due to the gradual drop of the water level, as well as the amount of subsidence recovery due to the gradual rise of the water level with artificial recharge, are evaluated. The results show that the subsidence in the sandy aquifer is less than the sandy aquifers with clay layers. With artificial recharge, approximately 90% of the subsidence can be recovered in the sandy aquifer, while the presence of clay zones increases the subsidence of the ground and also reduces the percentage of subsidence recovery. In aquifers, as the clay layers are placed at a greater distance from the ground surface, the land subsidence is reduced. Also, as the thickness of the clay layers is greater, the amount of subsidence will

be greater. Discontinuous clay layers in aquifers cause wavy subsidence of the ground surface. Also, the results show that as the time of water level drop increases, land subsidence increases, and the percentage of subsidence recovery often decreases or is almost constant.

References

- [1] M. Amighpey, S. Arabi, Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, (2016) 1-8.
- [2] S. Babaei, Z. Mousavi, Z. Masoumi, AH. Malekshah, M. Roostaei, M. Aflaki, Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran, *International Journal of Remote Sensing*, (2020).
- [3] F. Rafiei, S. Gharechelou, S. Golian, B.A. Johnson, Aquifer and Land Subsidence Interaction Assessment Using Sentinel-1 Data and DInSAR Technique, *International Journal of Geo-Information*, 11(9) (2022).
- [4] M.A. Budihardjo, A. Chegenizadeh, and H. Nikraz, Land Subsidence: The Presence of Well and Clay Layer in Aquifer, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(6) (2014) 217-224.
- [5] M. Budhu, I.B. Adiyaman, The Influence of Clay Zones on Land Subsidence from Groundwater Pumping, *Ground Water*, (2013).



اثر لایه های رسی در فرو نشست زمین و جبران فرو نشست با تغذیه مصنوعی

لیدا متقی^{۱*}، علی بیت اللهی^۱، جابر ممقانیان^۲

۱- مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

کلمات کلیدی:

فرو نشست زمین

افت سطح آب های زیرزمینی

تغذیه مصنوعی

مدلسازی عددی

خاک غیراشباع

خلاصه: هدف از این تحقیق بررسی تاثیر لایه های رسی در فرو نشست زمین در اثر افت سطح آب و همچنین اثر لایه های رسی در درصد جبران فرو نشست در اثر بالامدگی سطح آب در تغذیه مصنوعی می باشد. مدل المان محدود بر روی یک آبخوان ماسه ای و آبخوان های ماسه ای با موقعیت های مختلف قرارگیری لایه های رسی به کار گرفته شده است. در هر آبخوان سطح آب به تدریج افت کرده و فرو نشست زمین برآورد می شود. سپس در یک دوره مشخص سطح آب به تدریج به سطح اولیه خود بر می گردد و در نهایت درصد جبران فرو نشست برآورد می شود. نتایج نشان می دهد با تغذیه مصنوعی می توان درصدی از فرو نشست را جبران کرد که این مقدار بسته به مصالح آبخوان، ضخامت و موقعیت قرارگیری لایه های رسی متفاوت می باشد. در آبخوان فقط ماسه ای فرو نشست زمین نسبت به آبخوان های ماسه ای با لایه های رسی کمتر بوده و همچنین می توان با تغذیه مصنوعی حدود ۹۰٪ از فرو نشست ایجاد شده در آبخوان فقط ماسه ای را جبران کرد. وجود لایه های رسی باعث افزایش فرو نشست زمین در اثر افت سطح آب شده و بسته به موقعیت و ضخامت لایه های رسی در اثر تغذیه مصنوعی تقریباً ۱۹٪ الی ۴۶٪ از فرو نشست ایجاد شده در آبخوان های ماسه ای دارای لایه های رسی قابل جبران است. زمان افت سطح آب بیشتر در فرو نشست آبخوان های ماسه ای با لایه های رسی که در عمق کمتری قرار دارند تاثیرگذار بوده و باعث افزایش فرو نشست زمین می شود و از طرفی در این نوع آبخوان ها با افزایش زمان، درصد جبران نشست در اثر تغذیه مصنوعی به طور متوسط ۱۳٪ کاهش می یابد.

۱- مقدمه

فرو نشست زمین حرکت رو به پایین سطح زمین در اثر تغییرات تنش خاک است. دلایل زیادی برای فرو نشست زمین وجود دارد، که اینها شامل استخراج معادن، تراکم هیدرولیکی خاک های تراکم پذیر، فعالیت های لرزهای و برداشت سیال (نفت، آب) و ... می باشد. بهره برداری بیش از حد از منابع آب های زیرزمینی باعث افزایش تنش مؤثر و در نتیجه فشردگی رسوبات ریزدانه و نشست سیستم آبخوان می شود [۱]. اصل تنش مؤثر بین دانه ای در سال ۱۹۲۳ توسط ترزاچی^۱ بیان شد [۱]. اولین مشاهدات مربوط به فرو نشست زمین در اثر حذف سیال زیرسطحی در سال ۱۹۲۶ توسط زمین شناسان آمریکایی بود که در مورد فرو نشست زمین در شبه جزیره ای در مرکز یک میدان نفتی بحث کردند [۲]. همچنین در سال ۱۹۳۳ اولین

ثبت نشست زمین ناشی از پمپ آب زیرزمینی در دره سانتا کلارا^۲ (کالیفرنیا، ایالات متحده) ارائه شد [۳]. فرو نشست زمین می تواند پیامدهای منفی مانند تشکیل شکاف های زمینی، تغییرات مورفولوژی خاک، افزایش پتانسیل سیل و آسیب به زیرساخت های زیرزمینی داشته باشد. فرو نشست زمین در سرتاسر جهان همچون، دلتای شانگهای چین، جاکارتا اندونزی، منطقه رومانیای ایتالیا، سواحل اقیانوس اطلس آمریکای شمالی، شمال خلیج مکزیک و ... گزارش شده است [۴-۹]. در سال های اخیر، فرو نشست زمین ناشی از بهره برداری بی رویه از آب های زیرزمینی در مناطق مختلف ایران هم گزارش شده است، که به طور مثال می توان به فرو نشست زمین در یزد، دشت تهران، اراک، دره کاشمر، نیشابور، مرند و ... اشاره نمود [۱۰-۱۶]. در مطالعات گسترده ای در سطح جهان، فرو نشست از جنبه های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که در بسیاری از آنها پایش و اندازه گیری فرو نشست به صورت میدانی و ماهواری بررسی شده است [۱۳-۱۹]. در تعدادی از مطالعات فرو نشست به

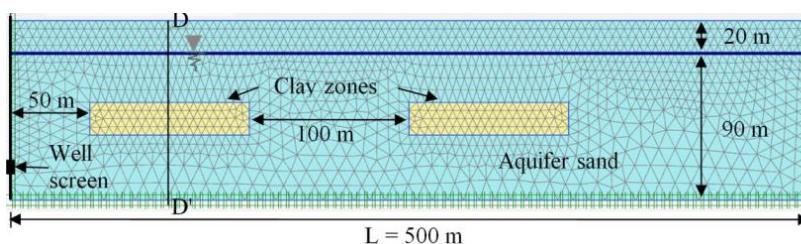
1. Terzaghi

* نویسنده عهده دار مکاتبات: lidamottaghi@yahoo.com

2. Santa Clara Valley

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱. هندسه مدل و موقعیت لایه های رسی جهت صحت سنجی

Fig. 1. The geometry of the model and the position of the clay zones for validation

۲- مدل سازی عددی

۲-۱- نرم افزار مورد استفاده جهت مدل سازی

در این تحقیق جهت مدل سازی و برآورد فرونشست آبخوان در اثر افت تراز آب زیرزمینی از نرم افزار المان محدود Plaxis 2D استفاده شده است. Plaxis نرم افزاری کاربردی در مدل سازی و تحلیل مسائل مختلف ژئوتکنیکی به روش اجزا محدود می باشد که برای تحلیل پایداری، جریان آب زیرزمینی، تغییر شکل و ... استفاده می شود. در این نرم افزار تحلیل مسائل بر اساس معادلات کوپل تحکیم بایوت انجام می شود. در معادلات بایوت اثر متقابل اسکلت جامد خاک و سیال منفذی در نظر گرفته می شود. تحلیل تغییر شکل ها در اثر افت سطح آب زیرزمینی به صورت تابعی از زمان، با روش "Fully coupled deformation" انجام می شود که تبدیل فشار آب حفره ای به تنش موثر در اثر افت سطح آب را در زمان مورد نظر، در نظر گرفته و تغییر شکل های ایجاد شده را برآورد می کند.

۲-۲- صحت سنجی روند مدل سازی

برای صحت سنجی روند مدل سازی، مثال مقاله [۲۳] انتخاب شده است که یک آبخوان ماسه ای با دو لایه رس می باشد که هندسه این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است.

این مسئله در ۴ فاز تحلیل شده است

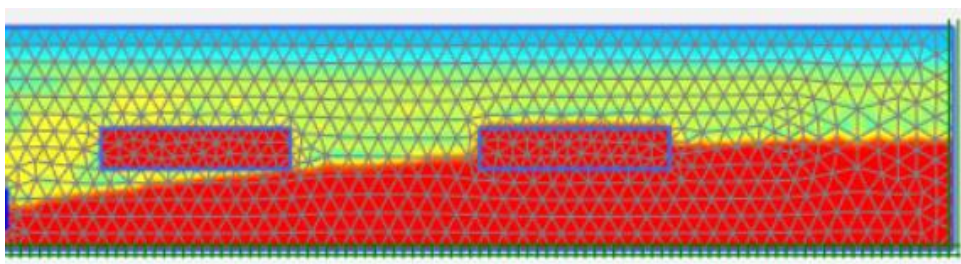
- فاز اول: مرحله آغازین مدل است که سطح آب در ۲۰- متری قرار دارد.
- فاز دوم: پمپ به مدت ۶ ماه با نرخ ۲۰ مترمکعب در روز از چاه انجام می شود.
- فاز سوم: پمپ متوقف شده و سطح آب در ۱۰ سال به ۸۰- متری افت می کند.
- فاز چهارم: آب در مدت ۱۰ سال دوباره از ۸۰- متری به ۲۰- متری می رسد (تغذیه مصنوعی).

در شکل ۲ درجه اشباع فاز دوم و فاز سوم تحلیل برای مدل مقاله مرجع [۲۳] و مدل این تحقیق مقایسه شده است. همانطور که دیده می شود درجه

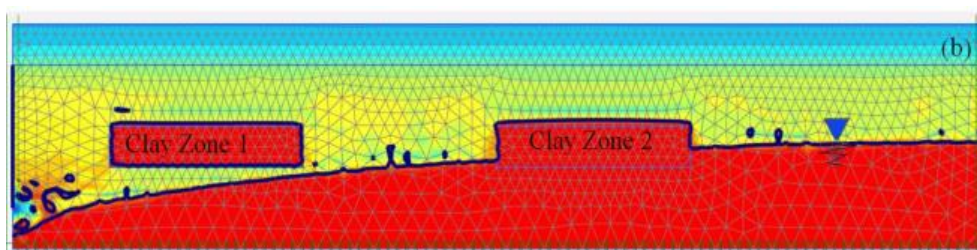
صورت عددی بررسی شده است: جین و همکاران^۱ آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای تاثیرگذار در فرونشست زمین به علت برداشت آب های زیرزمینی را انجام دادند [۲۰]. شیاری و همکاران^۲ کد کامپیوتری MODFLOW را برای محاسبه فرونشست زمین گسترش دادند [۲۱]. بودهو و همکاران^۳ یک روش تحلیلی برای مکانیزم فرونشست مخروطی زمین در اطراف چاه پیشنهاد داده و نتایج روش خود را با داده های میدانی (InSAR) و نرم افزار Plaxis مقایسه کرده اند [۲۲]. همچنین آنها در مطالعه ای دیگر، تاثیر وجود لایه های رسی را در فرونشست زمین در اثر برداشت آب بررسی کردند [۲۳]. بودیهاردجو و همکاران^۴ وجود لایه های رسی، الگوهای مختلف قرارگیری آن، ضخامت لایه ها، تعداد چاه و نرخ پمپ را در نشست زمین بررسی کردند [۲۴]. جهانگیر و همکاران با استفاده از مدل الاستوپلاستیک موهرکلمب فرونشست زمین در دشت اراک را محاسبه کردند [۲۵]. رجبی فرونشست دشت علی آباد قم را با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D بررسی کرد [۲۶]. در مطالعات قبلی، بودیهاردجو و همکاران [۲۴] اثر وجود لایه های رسی، الگوهای مختلف قرارگیری آن، ضخامت لایه های رسی را در فرونشست زمین بررسی کردند که در آن، افت سطح آب در اثر استخراج آب از پمپ در نظر گرفته شده است. همچنین بودهو و همکاران [۲۳] تاثیر وجود لایه های رسی را در فرونشست زمین در اثر افت سطح آب و تغذیه مصنوعی فقط در یک مورد، بررسی کردند در حالیکه ناحیه های رسی ممکن است حالت های مختلفی داشته باشد. لذا در این مطالعه اثر وجود لایه های رسی و الگوهای مختلف قرارگیری آن در فرونشست زمین در اثر افت سطح آب در حالت های مختلف بررسی شده و همچنین درصد جبران فرونشست در اثر تغذیه مصنوعی و تاثیر مدت زمان افت سطح آب در جبران فرونشست مورد بررسی قرار گرفته است.

1. Jin et al
2. Shearer et al
3. Budhu et al
4. Budihardjo et al

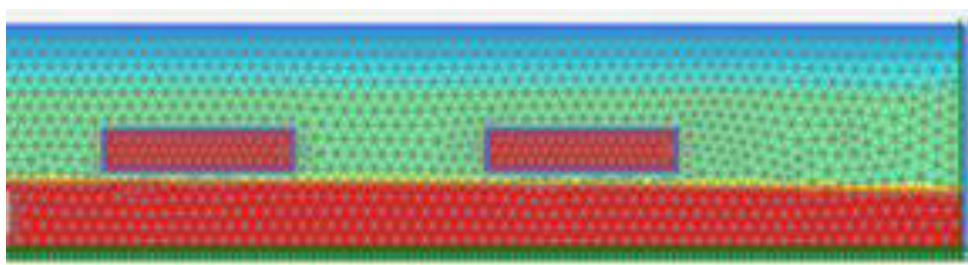
(الف)



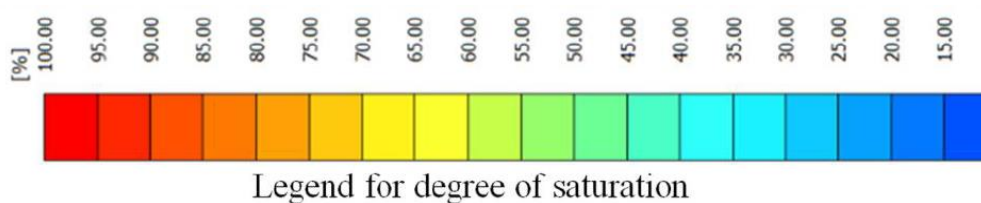
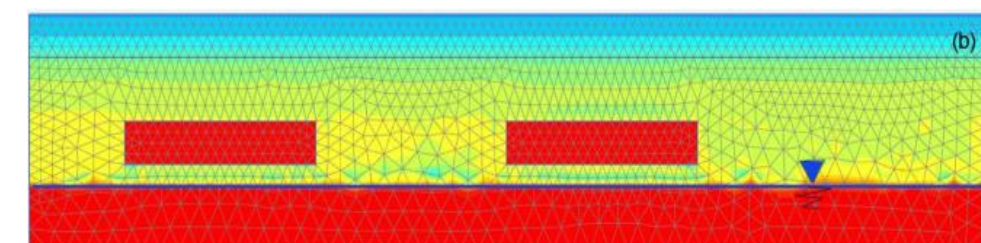
(ب)



(ج)



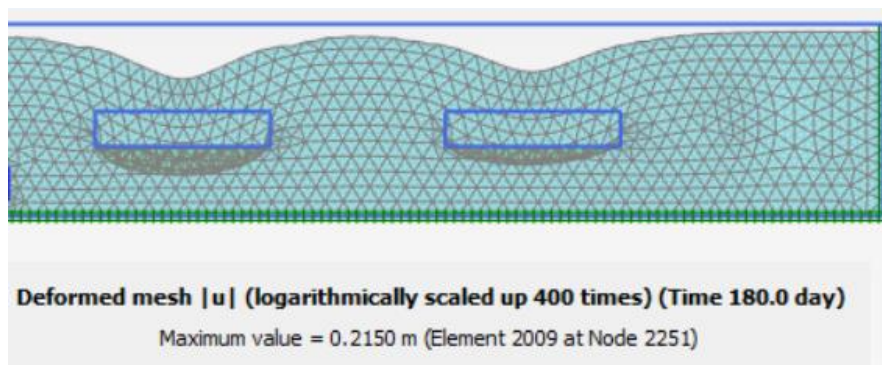
(د)



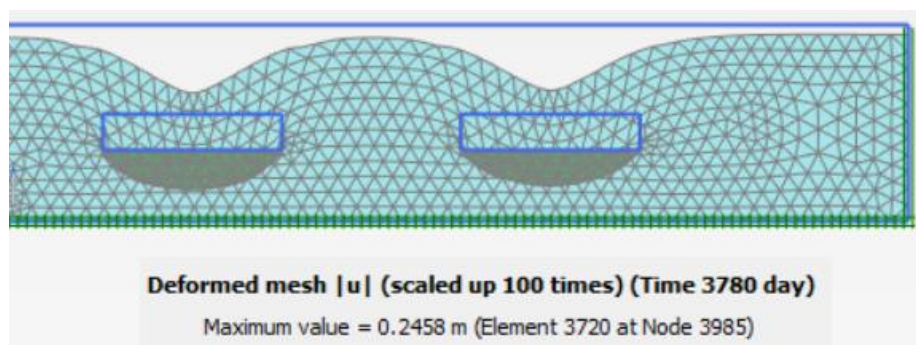
شکل ۲. درجه اشباع (الف) فاز دوم مدل، (ب) فاز دوم مقاله مرجع، (ج) فاز سوم مدل و (د) فاز سوم مقاله مرجع

Fig. 2. Degree of saturation: a) The phase 2 of the model this study, b) The phase 2 of the reference paper, c) The phase 3 of the model this study, d) The phase 3 of the reference paper.

(الف)



(ب)



شکل ۳. بیشترین جابجایی مدل: الف) فاز دوم و ب) فاز سوم

Fig. 3. Maximum displacement of the model this study a) Phase 2 and b) Phase 3.

۳-۲- مشخصات خاک و شرایط مرزی مسئله

مدلهای رفتاری مختلفی برای مدلسازی لایه‌های خاک در نرم‌افزار Plaxis وجود دارد همچون Mohr-Coulomb, Hardening soil, Soft Soil و ... که در این مطالعه برای همه مصالح (ماسه و رس) از مدل modified Cam-Clay استفاده شده و شرایط کرنش مسطح با المانهای ۶ گرهی و مش بندی ریز برای مدلسازی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی بدین صورت انتخاب شده که از جابه جایی کف مدل در جهت افقی و قائم و از جابه جایی افقی مرزهای قائم کناره مدل جلوگیری گردد. در جدول ۱ مشخصات مصالح در مدلسازی عددی ارائه شده است.

۳- مطالعات پارامتری

برای بررسی اهداف مورد نظر در این مقاله یک آبخوان ماسه‌ای با حالت‌های مختلف لایه‌های رسی در نظر گرفته شده و اثر لایه‌های رسی در فرونشست زمین در اثر افت سطح آب و تغذیه مصنوعی بررسی شده است. لذا برای رسیدن به این هدف حالت‌ها و سناریوهای مختلفی برای تحلیل

اشباع مدل این تحقیق و مقاله مرجع مشابه می باشد.

وجود لایه‌های رسی باعث می‌شود فرونشست زمین حالت اعوجاج داشته باشد. در شکل ۳ بیشترین جابجایی فاز دوم و سوم تحلیل برای مدل نشان داده شده است. در فاز دوم تحلیل، بیشترین جابجایی در وسط لایه رسی نزدیک چاه ایجاد شده این مقدار برای مدل مقاله مرجع ۰/۲۳ متر و برای مدل این تحقیق ۰/۲۲ متر بوده است. در فاز سوم، بیشترین جابجایی مدل در مقاله مرجع ۰/۲۵ متر و برای مدل در این تحقیق ۰/۲۴۵ متر بوده است. بیشترین جابجایی در مرحله چهارم فاز برای مدل در مقاله مرجع تقریباً ۰/۱۷۵ متر بوده و برای مدل در این تحقیق ۰/۱۶۳ متر است.

مقایسه نتایج مقاله مرجع و مدل این تحقیق، نشان دهنده صحت سنجی روند استفاده شده برای مدلسازی فرونشست در فازهای مختلف تحلیل می‌باشد و اختلاف جزئی هم می‌تواند ناشی از خطاهای محاسباتی نرم‌افزار به دلیل متفاوت بودن ورژن نرم افزارهای Plaxis باشد.

جدول ۱. پارامترهای خاک [۲۷]

Table 1. Soil parameters [27]

پارامتر	توصیف	واحد	مصالح	
			ماسه	رس
γ_{unsat}	Unsaturated specific weight	kN/m ³	17	15
γ_{sat}	Saturated specific weight	kN/m ³	20	18
e_0	Initial void ratio		0.5	1.1
λ	Compression index		0.01	0.2
κ	Recompression index		1.5e-3	0.035
ν	Poissons ratio		0.3	0.3
M	Friction angle of the soil at critical state		1.3	1.2
C	Cohesion	Kpa	0.1	1
ϕ'	Friction angle	°	35	25
$K_{0,x}$	Lateral earth pressure coefficient		0.5	0.57
OCR	Overconsolidation ratio		2	1
k_x	Lateral hydraulic conductivity	m/day	2	4.75e-3
k_y	Horizontal hydraulic conductivity	m/day	2	4.75e-3
S_{res}	Residual saturation		0.06203	0.1789
S_{sat}	Fully saturated condition		1	1
g_n	Van Genuchten parameter		1.377	1.09
g_a	Van Genuchten parameter	1/m	3.83	0.8

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج حالت اول

برای حالت آبخوان ماسه‌ای، در جدول ۳ بیشترین فرونشست در اثر افت تدریجی سطح آب، نشست باقی مانده زمین بعد از بالا آمدگی سطح آب (تغذیه مصنوعی)، میزان جبران فرونشست و همچنین درصد جبران فرونشست در اثر تغذیه مصنوعی، در طی زمان های مختلف آورده شده است. همانطوری که در این جدول مشخص است، وقتی خاک آبخوان فقط ماسه ای می باشد نشست کمتری در اثر افت سطح آب ایجاد شده و در اثر تغذیه مصنوعی حدوداً ۹۰٪ فرونشست ایجاد شده قابل جبران می باشد.

۴-۲- نتایج حالت دوم

در حالت دوم وجود لایه رسی به ضخامت ۱۰ متر در عمق ۴۵ متری زیر سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول ۴ ارائه شده است. همانطوری که در این جدول مشخص است وجود لایه رسی باعث می شود فرونشست ایجاد شده بیشتر از حالت آبخوان ماسه

مدل ها در نظر گرفته شده است. در همه حالت ها فرض بر این بوده که سطح اولیه آب در ۲۰ متری زیر سطح زمین قرار داشته است. حالت ها و سناریوهای در نظر گرفته شده بر این اساس بوده که اثر لایه رسی منقطع و یا پیوسته، لایه رسی در عمق پایین تر یا نزدیک به سطح زمین و ضخامت لایه رسی در نشست زمین بررسی شود.

حالت اول: آبخوان ماسه ای (شکل ۴-الف)

حالت دوم: وجود لایه رسی به ضخامت ۱۰ متر در عمق ۴۵ متری زیر سطح زمین (شکل ۴-ب)

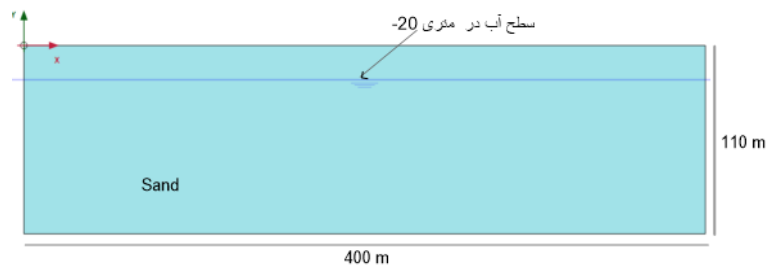
حالت سوم: وجود لایه رسی به ضخامت ۱۰ متر در عمق ۴۵ متری زیر سطح زمین در حالت منقطع (شکل ۴-ج)

حالت چهارم: وجود لایه رسی به ضخامت ۱۰ متر در عمق ۲۵ متری زیر سطح زمین در حالت منقطع (شکل ۴-د)

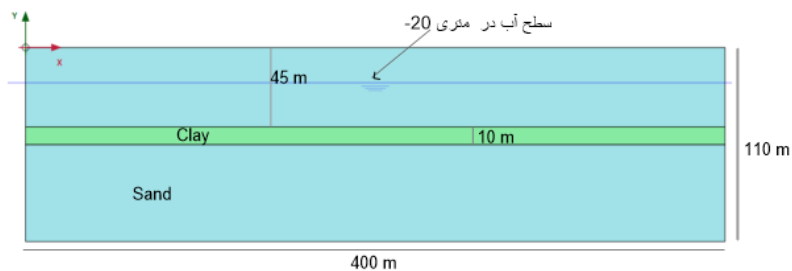
حالت پنجم: وجود لایه رسی به ضخامت ۳۰ متر در عمق ۲۵ متری زیر سطح زمین در حالت منقطع (شکل ۴-و)

سناریوهای مورد بررسی در جدول ۲ آورده شده است.

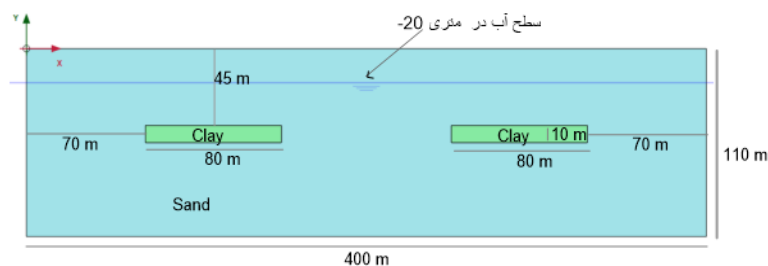
(الف)



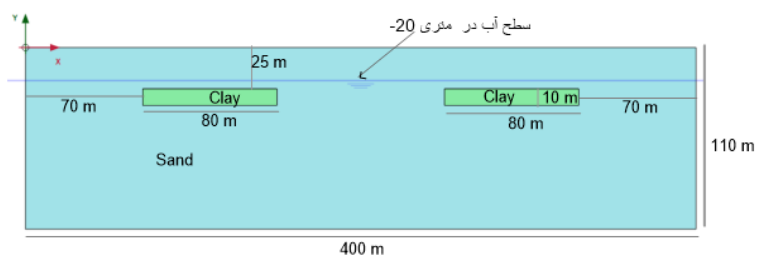
(ب)



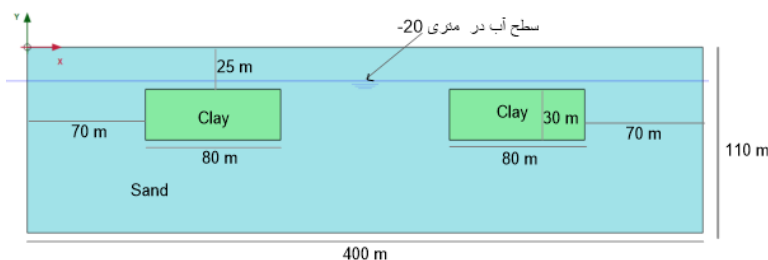
(ج)



(د)



(و)



شکل ۴. حالت‌های آبخوان: الف) آبخوان ماسه ای بدون رس، ب) آبخوان ماسه ای با یک لایه رس پیوسته در عمق ۴۵ متری، ج) آبخوان ماسه ای با دو لایه رس نازکتر در عمق ۴۵ متری، د) آبخوان ماسه ای با دو لایه رس ضخیم تر در عمق ۲۵ متری، و) آبخوان ماسه ای با دو لایه رس ضخیم تر در عمق ۲۵ متری

Fig. 4. States of aquifer: a) Sandy aquifer without clay, b) Sandy aquifer with continuous clay layer at a depth of 45 meters, c) Sandy aquifer with discontinuous thinner clay layer at a depth of 45 meters, d) Sandy aquifer with discontinuous thinner clay layer at a depth of 25 meters, e) Sandy aquifer with discontinuous thicker clay layer at a depth of 25 meters.

جدول ۲. سناریوهای در نظر گرفته شده جهت تحلیل

Table 2. Scenarios considered for analysis

نوع تحلیل	
Fully coupled flow- deformation	
زمان	فاز تحلیل
۵ سال	افت سطح آب از ۲۰- به ۷۰- متری
۱۰ سال	بالا بردن سطح آب از ۷۰- به ۲۰- متری
۱۰ سال	افت سطح آب از ۲۰- به ۷۰- متری
۱۰ سال	بالا بردن سطح آب از ۷۰- به ۲۰- متری
۲۰ سال	افت سطح آب از ۲۰- به ۷۰- متری
۱۰ سال	بالا بردن سطح آب از ۷۰- به ۲۰- متری
۵۰ سال	افت سطح آب از ۲۰- به ۷۰- متری
۱۰ سال	بالا بردن سطح آب از ۷۰- به ۲۰- متری
۱۰۰ سال	افت سطح آب از ۲۰- به ۷۰- متری
۱۰ سال	بالا بردن سطح آب از ۷۰- به ۲۰- متری

جدول ۳. نتایج حاصل از تحلیل در سناریوهای مختلف حالت اول

Table 3. The results of the analysis in different scenarios for the state 1

مدت زمان افت سطح آب (سال)	فرونشست زمین در اثر افت سطح آب (mm)	نشست باقی مانده زمین بعد از تغذیه مصنوعی (mm)	جبران فرونشست (mm)	درصد جبران فرونشست
5	22.82	1.333	21.487	94.15
10	23.46	1.725	21.735	92.64
20	24.64	2.152	22.488	91.26
50	27.45	2.689	24.761	90.20
100	29.38	2.95	26.43	89.95

جدول ۴. نتایج حاصل از تحلیل در سناریوهای مختلف حالت دوم

Table 4. The results of the analysis in different scenarios for the state 2

مدت زمان افت سطح آب (سال)	فرونشست زمین در اثر افت سطح آب (mm)	نشست باقی مانده زمین بعد از تغذیه مصنوعی (mm)	جبران فرونشست (mm)	درصد جبران فرونشست
5	300.3	242.3	58	19.31
10	301.8	242.9	58.9	19.51
20	304.4	244.5	59.9	19.67
50	313.6	253.6	60	19.13
100	320.2	258.2	62	19.36

جدول ۵. نتایج حاصل از تحلیل در سناریوهای مختلف حالت سوم

Table 5. The results of the analysis in different scenarios for the state 3

مدت زمان افت سطح آب (سال)	فرونشست زمین در اثر افت سطح آب (mm)	نشست باقی مانده زمین بعد از تغذیه مصنوعی (mm)	جبران فرونشست (mm)	درصد جبران فرونشست
5	106.7	57.04	49.66	46.54
10	108.1	58.42	49.68	45.95
20	108.7	59.23	49.47	45.51
50	112.9	61.19	51.71	45.80
100	116.5	65.81	50.69	43.51

جدول ۶. نتایج حاصل از تحلیل در سناریوهای مختلف حالت چهارم

Table 6. The results of the analysis in different scenarios for the state 4

مدت زمان افت سطح آب (سال)	فرونشست زمین در اثر افت سطح آب (mm)	نشست باقی مانده زمین بعد از تغذیه مصنوعی (mm)	جبران فرونشست (mm)	درصد جبران فرونشست
5	104.2	64.17	40.03	38.416
10	109.6	70.21	39.39	35.939
20	118.4	75.31	43.09	36.393
50	136.9	99.21	37.69	27.531
100	191.3	147.7	43.6	22.791

ای شود و همچنین در این حالت حدود ۱۹٪ فرونشست ایجاد شده با استفاده از روش تغذیه مصنوعی قابل جبران است.

۴-۳- نتایج حالت سوم

در حالت سوم وجود لایه رسی به ضخامت ۱۰ متر در عمق ۴۵ متری زیر سطح زمین در حالت منقطع مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول ۵ ارائه شده است. همانطوری که در این جدول مشخص است در این حالت لایه های رسی به صورت منقطع در ۴۵ متری سطح زمین در آبخوان ماسه ای قرار دارد، در شرایطی همانند این مثال حدود ۴۵٪ فرونشست قابل جبران است.

۴-۴- نتایج حالت چهارم

در حالت چهارم وجود لایه رسی به ضخامت ۱۰ متر در عمق ۲۵ متری

زیر سطح زمین در حالت منقطع مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول ۶ ارائه شده است. همانطوری که در این جدول مشخص است وقتی لایه های رسی به صورت منقطع در عمق نزدیک به سطح زمین قرار دارد فرونشست بیشتر از حالتی است که لایه رسی در عمق بیشتری قرار داشته باشد و همچنین درصد جبران فرونشست در این حالت کمتر از حالت سوم می باشد.

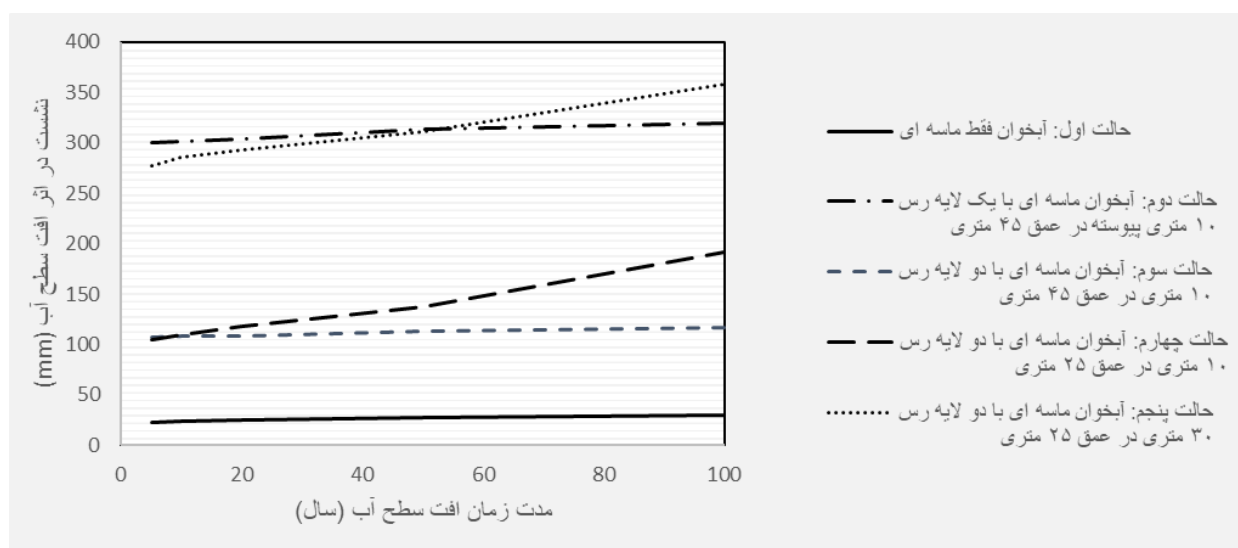
۴-۵- نتایج حالت پنجم

در حالت پنجم وجود لایه رسی به ضخامت ۳۰ متر در عمق ۲۵ متری زیر سطح زمین در حالت منقطع مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول ۷ ارائه شده است. همانطوری که در این جدول مشخص است وجود لایه رسی با ضخامت بیشتر باعث می شود فرونشست نسبت به حالت لایه رسی با ضخامت کمتر، بیشتر شده و درصد جبران نشست هم

جدول ۷. حاصل از تحلیل در سناریوهای مختلف حالت پنجم

Table 7. The results of the analysis in different scenarios for the state 5

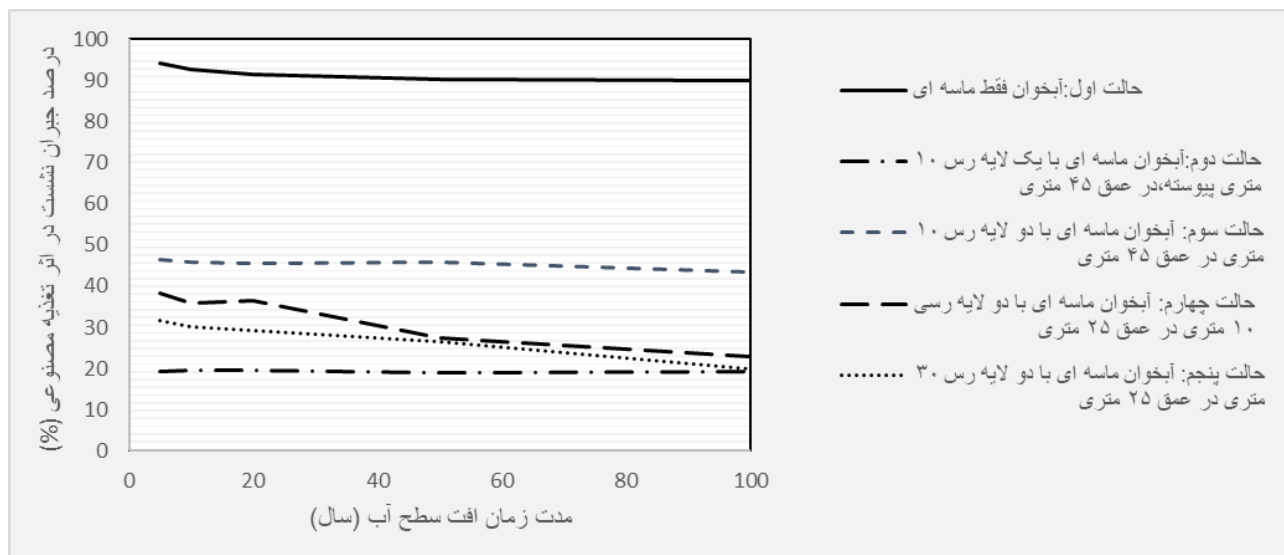
مدت زمان افت سطح آب (سال)	فرونشست زمین در اثر افت سطح آب (mm)	نشست باقی مانده زمین بعد از تغذیه مصنوعی (mm)	جبران فرونشست (mm)	درصد جبران فرونشست
5	276.9	189.3	87.6	31.63
10	285.3	198.9	86.4	30.28
20	293.4	207.6	85.8	29.24
50	311.1	228.2	82.9	26.64
100	358.5	286.8	71.7	20



شکل ۵. مقایسه میزان فرونشست بین حالت‌های مختلف

Fig. 5. Comparison of the amount of subsidence between different states.

- کمر شود.
- هر چه لایه‌های رسی به سطح زمین نزدیکتر باشد تغییرات تنش موثر (اختلاف تنش موثر اولیه و تنش موثر بعد از افت سطح آب) بیشتر میشود. لذا وقتی لایه‌های رسی در عمق کمتری قرار می‌گیرند فرونشست بیشتر از حالتی است که لایه‌های رسی در عمق بیشتری قرار می‌گیرد (مقایسه حالت سوم و چهارم)، به عنوان مثال در ۵۰ سال افت سطح آب، اختلاف فرونشست حالت چهارم و سوم ۱۷ درصد می‌باشد.
 - با توجه به اینکه لایه‌های رسی شکل پذیری و خاصیت تراکم پذیری بالایی دارد لذا هر چه ضخامت لایه رسی بیشتر شود فرونشست هم بیشتر می‌شود. با مقایسه حالت چهارم و پنجم می‌توان گفت با افزایش
- در شکل ۵ میزان فرونشست بین حالت‌های مختلف مقایسه شده و همچنین تاثیر زمان افت سطح آب در فرونشست آورده شده است. با توجه به شکل ۵ می‌توان گفت:
- با توجه به اینکه خاک‌های رسی شکل پذیری بالایی نسبت به خاک‌های دانه ای دارند، لذا با افت سطح آب فرونشست در آبخوان‌ها با لایه های رسی بیشتر از فرونشست آبخوان‌های فقط ماسه ای می‌باشد.
 - فرونشست در آبخوان‌ها با لایه‌های رسی پیوسته بیشتر از آبخوان‌ها با لایه‌های رسی منقطع می‌باشد (مقایسه حالت دوم و حالت سوم)



شکل ۶. مقایسه میزان جبران فرونشست بین حالت‌های مختلف در اثر تغذیه مصنوعی.

Fig. 6. Comparison of subsidence recovery between different states due to artificial recharge.

اثر تغذیه مصنوعی درصد جبران فرونشست کمتر شود و در این مسئله با توجه به حالت‌های مختلف قرارگیری لایه‌های رسی در آبخوان‌ها ۱۹ الی ۴۶٪ از فرونشست ایجاد شده قابل جبران است.

با افزایش زمان افت سطح آب، درصد جبران فرونشست اغلب کمتر شده و یا تقریباً ثابت می‌ماند. در آبخوان‌های ماسه‌ای با لایه‌های رسی که در عمق کمتری قرار دارند (حالت چهارم و پنجم)، افزایش زمان افت سطح آب باعث می‌شود در اثر تغذیه مصنوعی به طور متوسط ۱۳٪ جبران فرونشست کمتر شود. به عنوان مثال در حالت چهارم در ۵ سال و ۱۰۰ سال افت سطح آب، به ترتیب ۳۸/۴ و ۲۲/۷۹ درصد از فرونشست جبران می‌شود یعنی با افزایش زمان از ۵ سال به ۱۰۰ سال باعث شده ۱۵/۶ درصد، جبران فرونشست کمتر شود. چون با افزایش زمان افت سطح آب، لایه‌های رسی بیشتر متراکم تر شده و تغییر در ساختار خاک‌های رسی باعث می‌شود جبران فرونشست کمتر شود.

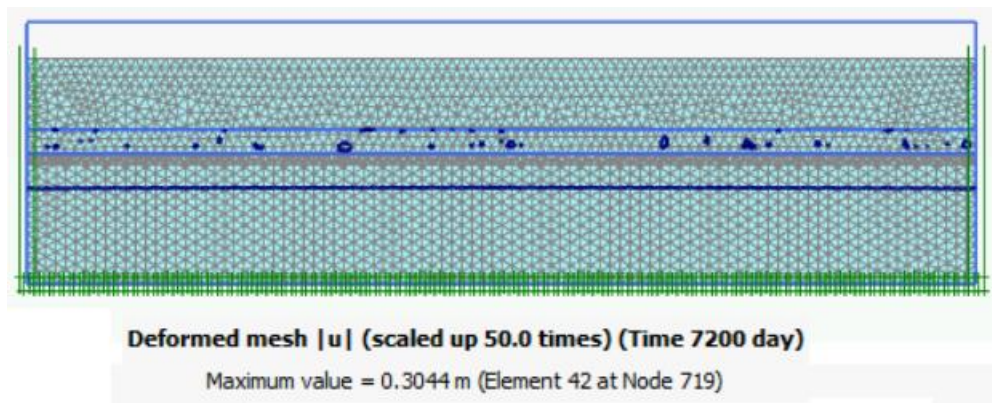
در شکل‌های ۷ و ۸ نیز پروفیل نشست زمین به ترتیب در حالت‌های لایه رسی پیوسته و منقطع مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، لایه‌های رسی پیوسته باعث فرونشست یکنواخت سطح زمین می‌شود اما وجود لایه‌های رسی منقطع باعث فرونشست موج دار می‌شود (شکل ۸).

ضخامت لایه از ۱۰ متری به ۳۰ متری، فرونشست در زمان ۵ و ۱۰۰ سال به ترتیب ۱۶۵/۷۳ و ۸۷/۴ درصد افزایش می‌یابد.

هرچه زمان افت سطح آب بیشتر باشد زمان برای زهکشی بیشتر بوده و فرونشست هم بیشتر می‌شود لذا در این مسئله هم با افزایش زمان افت سطح آب، فرونشست هم بیشتر می‌شود. زمان بیشتر در فرونشست آبخوان‌های ماسه‌ای با لایه‌های رسی که لایه‌های رسی در عمق کمتری قرار دارند تاثیرگذار هستند. به عنوان مثال در حالت چهارم با افزایش زمان افت سطح آب از ۵ سال به ۱۰۰ سال، فرونشست از ۱۰۴/۲ میلی متر به ۱۹۱/۳ میلی متر افزایش پیدا کرده است.

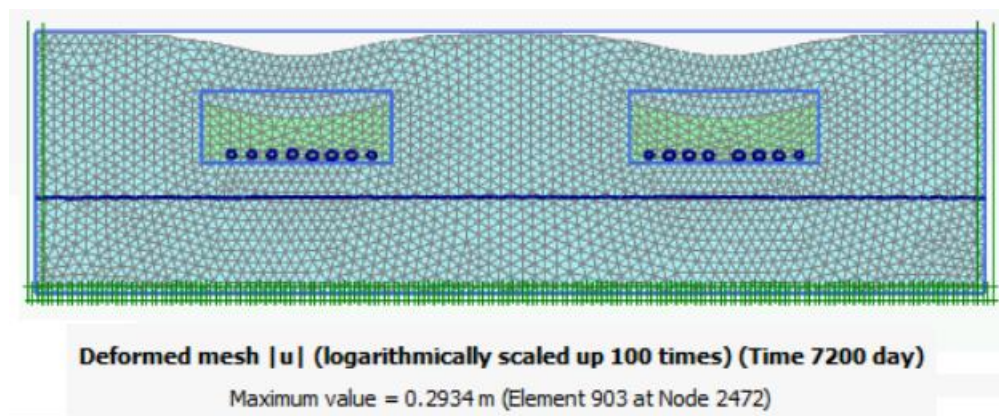
در شکل ۶، میزان جبران فرونشست در اثر تغذیه مصنوعی بین حالت‌های مختلف، مقایسه شده و همچنین تاثیر زمان افت سطح آب در میزان جبران فرونشست آورده شده است. با توجه به شکل ۶ می‌توان گفت:

در آبخوان‌های ماسه‌ای به دلیل ساختار دانه‌ای خاک، فرونشست تحکیمی کمتر بوده و از طرفی تغییرات کمتری در خلل و فرج خاک‌های ماسه‌ای نسبت به خاک‌های رسی ایجاد می‌شود. لذا بازیابی فرونشست در خاک‌های ماسه‌ای با تغذیه مصنوعی راحت‌تر و بیشتر می‌شود. در این مسئله با تغذیه مصنوعی در آبخوان فقط ماسه‌ای، تقریباً ۹۰٪ فرونشست قابل جبران است. اما لایه‌های رسی باعث می‌شود در



شکل ۷. فرونشست زمین در صورت وجود لایه رسی پیوسته در آبخوان ماسه ای

Fig. 7. Land subsidence in a sandy aquifer with the continuous clay layer.



شکل ۸. فرونشست زمین در صورت وجود لایه رسی منقطع در آبخوان ماسه ای.

Fig. 8. Land subsidence in a sand aquifer with discontinuous clay layer.

۵- نتیجه گیری

بهره برداری بیش از حد از منابع آب های زیرزمینی باعث افزایش تنش موثر و در نتیجه فشردگی دانه های خاک و فرونشست زمین می شود. فرونشست زمین می تواند پیامدهایی همچون تشکیل شکاف های زمینی، افزایش پتانسیل سیل، آسیب به زیر ساخت های زیرزمینی و ... داشته باشد. اخیراً روش هایی همچون تغذیه مصنوعی برای جبران فرونشست استفاده می شود. در این مطالعه آبخوان ماسه ای، آبخوان های ماسه ای با لایه های رسی در نرم افزار المان محدود Plaxis 2D مدل شده و فرونشست زمین در اثر افت تدریجی سطح آب و همچنین میزان جبران فرونشست در اثر بالابردگی تدریجی سطح آب در اثر تغذیه مصنوعی برآورد شده است. نتایج

نشان می دهد در آبخوان ماسه ای میزان فرونشست کمتر از آبخوان ماسه ای با لایه های رسی می باشد. با تغذیه مصنوعی تقریباً می توان ۹۰٪ فرونشست در آبخوان فقط ماسه ای را جبران کرد در حالیکه وجود لایه های رسی باعث افزایش فرونشست زمین شده و همچنین درصد جبران فرونشست هم کاهش پیدا می کند. هر چه عمقی که لایه های رسی قرار دارند بیشتر باشد فرونشست کمتر می شود و همچنین هر چه ضخامت لایه های رسی بیشتر شود فرونشست بیشتر خواهد بود. وجود لایه های رسی منقطع باعث فرونشست غیریکنواخت سطح زمین می شود. همچنین نتایج نشان می دهد هرچه زمان افت سطح آب بیشتر می شود، فرونشست زمین بیشتر شده و درصد جبران نشست اغلب کمتر شده و یا تقریباً ثابت می باشد.

- Tehran, Iran, Engineering Geology, 201(2016) 6-28.
- [11] A.M. Rajabi, E. Ghorbani, Land subsidence due to groundwater withdrawal in Arak plain, Markazi province, Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 9(738) (2016).
- [12] M. Amighpey, S. Arabi, Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, (2016) 1-8.
- [13] S. Alipour, M. Motgah, M.A. Sharifi, and T.R. Walter, InSAR Time Series Investigation of Land Subsidence Due to Groundwater Overexploitation in Tehran, Iran, Conference: Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas, (2008).
- [14] J. Anderssohn, H.U. Wetzell, T.R. Walter, M. Motagh, Y. Djamour, and H. Kaufmann, Land Subsidence Pattern Controlled by Old Alpine Basement Faults in the Kashmar Valley, Northeast Iran: Results from InSAR and Levelling, *Geophysical Journal International*, 174(1) (2008) 287-294.
- [15] M. Dehghani, M.J. Valadan Zoej, I. Entezam, A. Mansourian, and S. Saatchi, InSAR Monitoring of Progressive Land Subsidence in Neyshabour, Northeast Iran, *Geophysical Journal International*, 178(1) (2009) 47-56.
- [16] O. Ghorbanzadeh, H. Rostamzadeh, T. Blaschke, Kh. Gholaminia, and J. Aryal, A New GIS-Based Data Mining Technique Using an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) and k-Fold Cross-Validation Approach for Land Subsidence Susceptibility Mapping., *Natural Hazards* 94(2) (2018) 497-517.
- [17] S. Babaei, Z. Mousavi, Z. Masoumi, A.H. Malekshah, M. Roostaei, M. Aflaki, Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran, *International Journal of Remote Sensing*, (2020).
- [18] O. Orhan, Monitoring of land subsidence due to excessive groundwater extraction using small baseline subset technique in Konya, Turkey, *Environmental Monitoring and Assessment*, 193 (174) (2021).
- [1] K. Terzaghi, Principles of Soil Mechanics: I—Phenomena of Cohesion of Clays, *Engineering News-Record*, 95(19) (1925) 742-746.
- [2] W.E. Pratt, and D.W. Johnson, Local subsidence of the Goose Creek oil field, *Journal of Geology*, 34 (7) (1926) 577-590.
- [3] H.S. Rappleye, Recent areal subsidence found in releveling, *Engineering News Record*, (1933).
- [4] J.C. Chai, S.L. Shen, H.H. Zhu, and X.L. Zhang, Land Subsidence Due to Groundwater Drawdown in Shanghai, *Géotechnique* 54(2) (2004) 143-47.
- [5] H.Z. Abidin, R. Djaja, D. Darmawan, S. Hadi, A. Akbar, H. Rajiyowiryo, Y. Sudibyo, I. Meilano, M.A. Kasuma, J. Kahar and C. Subarya, Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and Its Geodetic Monitoring System, *Natural Hazards*, (2001) 365-387.
- [6] G. Gambolati, P. Teatini, L. Tomasi, M. Gonella, Coastline Regression of the Romagna Region, Italy, Due to Natural and Anthropogenic Land Subsidence and Sea Level Rise, *Water Resources Research* 35(1) (1999) 163-184
- [7] P. Teatini, M. Ferronato, G. Gambolati, and M. Gonella, Groundwater Pumping and Land Subsidence in the Emilia-Romagna Coastland, Italy: Modeling the Past Occurrence and the Future Trend, *Water Resources Research* 42(1) (2006).
- [8] M.A. Karegar, T.H. Dixon, and S.E. Engelhart, Subsidence along the Atlantic Coast of North America: Insights from GPS and Late Holocene Relative Sea Level Data, *Geophysical Research Letters* 43 (7) (2016) 3126-3133.
- [9] A.S. Kolker, M.A. Allison, and S. Hameed S, An Evaluation of Subsidence Rates and Sea-Level Variability in the Northern Gulf of Mexico, *Geophysical Research Letters*, 38(21) (2011).
- [10] M. Mahmoudpour, M. Khamsehchiyan, M.R. Nikudel, and M.R. Ghassemi, Numerical Simulation and Prediction of Regional Land Subsidence Caused by Groundwater Exploitation in the Southwest Plain of

- Ground Water, (2013).
- [24] M.A. Budihardjo, A. Chegenizadeh, and H. Nikraz, Land Subsidence: The Presence of Well and Clay Layer in Aquifer, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 8(6) (2014) 217-224.
- [25] M. Jahangir, Z. Khosravi, H. Sarrafha, Modeling of land subsidence due to groundwater overexploitation using elastoplastic Mohr-Coulomb model in Arak plain, Iran, Geopersia, 11(1) (2021) 131-151.
- [26] A.M. Rajabi, A numerical study on land subsidence due to extensive overexploitation of groundwater in Aliabad plain, Qom-Iran, Natural Hazards, (2018) 1085–1103.
- [27] I.B. Adiyaman, Land Subsidence and Earth Fissures due to Groundwater Pumping, Ph.D. dissertation in Civil Engineering, University of Arizona, (2012).
- [19] F. Raffei, S. Gharechelou, S. Golian, B.A. Johnson, Aquifer and Land Subsidence Interaction Assessment Using Sentinel-1 Data and DInSAR Technique, International Journal of Geo-Information, 11(9) (2022).
- [20] W. Jin, Z. Luo, and X. Wu, Sensitivity Analysis of Related Parameters in Simulation of Land Subsidence and Ground Fissures Caused by Groundwater Exploitation, Bulletin of Engineering Geology and the Environment 75(3) (2016) 1143-1156.
- [21] T.R. Shearer, A Numerical Model to Calculate Land Subsidence, Applied at Hangu in China.” Engineering Geology 49(2) (1998) 85-93.
- [22] M. Budhu, I.B. Adiyaman I.B, Mechanics of land subsidence due to groundwater pumping, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. (2010) 1459–1478.
- [23] M. Budhu, I.B. Adiyaman, The Influence of Clay Zones on Land Subsidence from Groundwater Pumping,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

L. Mottaghi, A. Beitollahi, J. Mamaghanian, *Effect of clay layers on land subsidence and subsidence recovery with aquifer recharge*, Amirkabir J. Civil Eng., 57(5) (2025) 893-908.

DOI: [10.22060/ceej.2025.22804.8050](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.22804.8050)

