

پیش بینی نشست منطقه‌ای زمین به روش محاسبه برگشتی و تأثیر نشست بر شبکه فاضلاب

محمد محسن توفیق^۱ سید طاها طباطبایی عقدا^۲

(دریافت ۸۵/۷/۱۱ پذیرش ۸۷/۱۱/۲۶)

چکیده

یکی از مهم‌ترین علل نشست منطقه‌ای زمین، برداشت بیش از حد آب زیرزمینی است. نشست‌های نامساوی سبب ایجاد شکافهایی در سطح زمین، خسارات به سازه‌ها، جاده‌ها، تاسیسات شهری، مسیر راه آهن و همچنین باعث تغییر شیب کانال‌های آبیاری، مجاری آب و سیستم فاضلاب شهری می‌شود. برای مدل‌سازی نشست بر اثر افت سطح آب زیرزمینی، مدل اجزای محدود تحکیم کوپل تهیه و به کار گرفته شد. این مدل بر اساس تئوری تحکیم سه بعدی بایوت فرمول‌بندی شده است. در این تحقیق شهر رفسنجان برای مطالعه موردی در نظر گرفته شد. به این منظور مجموعه اطلاعات مؤثر و مرتبط با نشست زمین از جمله نقشه‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، آبهای زیرزمینی، پروفیل خاک و نشست‌های اندازه‌گیری شده در منطقه تهیه شد. با توجه به کمبود اطلاعات آزمایشگاهی از پروفیل خاک مناطق مختلف، با اندازه‌گیری میزان نشست و انجام محاسبه برگشتی در چندین نقطه، اطلاعات لازم برای تهیه مدل در سایر مناطق شهر فراهم شد. سپس با تهیه مدل نرم‌افزاری، میزان و روند نشست شهر رفسنجان در سالهای آتی، پیش‌بینی و تأثیرات آن بر شبکه فاضلاب مشخص گردید.

واژه‌های کلیدی: فرونشست منطقه‌ای، برداشت آب زیرزمینی، تحکیم، شبکه فاضلاب، رفسنجان.

Land Subsidence Prediction by Back Calculation Method and its Effects on Sewage Network

Mohammad Mohsen Toufigh¹

Seyed Taha Tabatabaee Aghda²

(Received Oct. 2, 2006 Accepted Feb. 14, 2009)

Abstract

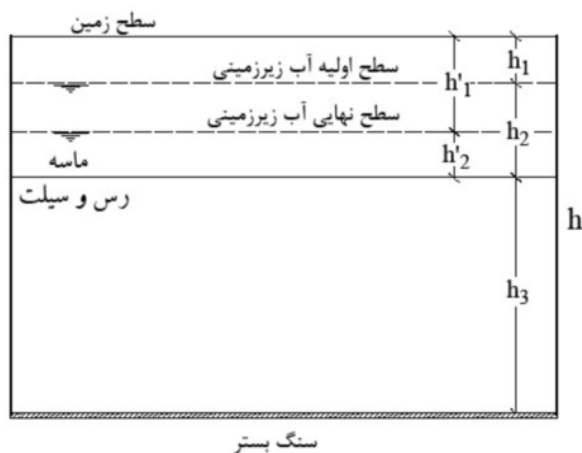
Groundwater overdraft is one of the main reasons of land subsidence. Differential subsidence leads to earth fissures and damages to structures, roads, railroads, pipelines, irrigation canals, and sewage networks. In order to simulate land subsidence due to groundwater overdraft, a fully coupled finite element consolidation model was developed. Formulation of finite element was based on Biot three-dimensional consolidation theory. Land subsidence studies in Rafsanjan City were conducted by collecting and analyzing data on geology, geophysics, hydrology, soil properties, and observed land subsidence. Due to lack of sufficient experimental data about different soil profiles, land subsidence monitoring and back calculation were used in several spots to obtain the necessary data for use in other places. A computer model was finally developed to predict the subsidence of the city and its effects on the sewage network were studied.

Keywords: Land subsidence, Groundwater overdraft, Consolidation, Sewage network, Rafsanjan.

1- Associate Professor of Civil Engineering, Bahonar University, Kerman
2- MSc. of Geotechnical Eng., Building and Housing Research Center of
Iran, (Corresponding Author), (+98) 9133581905, taha.tabaa@gmail.com

۱- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان
۲- کارشناس ارشد مکانیک خاک و پی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن
(نویسنده مسئول) ۰۹۱۳۳۵۸۱۹۰۵، taha.tabaa@gmail.com

σ'_{v_0} تنش موثر قائم اولیه، σ'_{v_2} تنش موثر قائم و $\Delta\sigma'_v$ اضافه فشار موثر پس از افت سطح آب زیرزمینی به اندازه h ، γ وزن حجمی خاک، γ_w وزن حجمی آب، γ_{sand} وزن حجمی ماسه، $\gamma_{sat sand}$ وزن حجمی اشباع ماسه است [۳].



شکل ۱- تغییرات سطح آب زیرزمینی در پروفیل خاک

۳- مطالعه موردی شهر رفسنجان

شهر رفسنجان در ارتفاع ۱۵۱۰ متری از سطح دریا و مختصات جغرافیایی $30^{\circ}24'30''$ عرض شمالی و $55^{\circ}59'30''$ طول شرقی واقع شده است. مساحت این شهر $76/95$ کیلومتر مربع و جمعیت آن در حال حاضر حدود $130,000$ نفر برآورد شده است. رفسنجان دارای تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و خشک می‌باشد. میزان بارندگی در این شهر به ترتیب در سالهای آبی $81-82$ و $82-83$ به میزان $61/2$ و 44 میلی‌متر در سال است [۴].

۱-۳- زمین شناسی

از نقطه نظر زمین شناسی، دشت رفسنجان منشأ تکتونیکی دارد و دو زون ارومیه-دختر و ایران مرکزی را از هم جدا می‌کند. پایه نهشته‌های کواترنری در این منطقه رسوبات دریاچه‌ای شامل سیلت، رس همراه با نمک و ژئیس دانه‌ریز است. مخروط افکنه جوان، نهشته‌های بادی (تل ماسه) و پهنه‌های لای و نمک دیگر رسوبات دشت را تشکیل می‌دهند. این رسوبات با افزایش فاصله از منشأ آنها یعنی ارتفاعات، از دانه درشت به ریزدانه درجه‌بندی می‌شوند [۵].

۲-۳- آب زیرزمینی

برداشت آماری سطح آب در دشت رفسنجان تنها پس از سال 1370 قابل استناد است. به این جهت زمان شروع محاسبات مهر

نشست زمین^۱، به علت پایین رفتن سطح آن در اثر تغییر شکل و جابه‌جایی‌های صورت گرفته در لایه‌های زیرین خاک اتفاق می‌افتد. در 80 درصد موارد علت اصلی نشست، استخراج بیش از حد آب از سفره‌های آب زیرزمینی است [۱].

افزایش وزن ناشی از خروج آب از منافذ لایه‌های شن و ماسه واقع بر یک بستر رسی و سیلتی، باعث فشردگی لایه‌های رس و سیلت می‌گردد. فشردگی خاک ریزدانه اشباع با خروج آب منفذی آن، با فرایند زمان‌بر تحکیم^۲ انجام می‌گیرد. تحکیم و فشردگی تدریجی این لایه‌ها، باعث نشست و ترک خوردگی سطح زمین می‌شود.

نشست ناشی از افت آب زیرزمینی، در لایه‌های زیرین خاک اتفاق می‌افتد و به این ترتیب لوله‌های فاضلاب که در عمق کم، قرار دارند، همراه با خاک مجاورشان جابه‌جا می‌شوند. اختلاف نشست در مسیر لوله‌ها باعث تغییر شیب، ترک خوردگی و جداشدگی لوله‌ها می‌شود. در مواردی اختلاف نشست به حدی است که شیب لوله معکوس شده و انتقال فاضلاب متوقف می‌گردد [۲].

۲- اثر افت سطح آب زیرزمینی بر تنش اعمالی به

لایه‌های زیرین خاک

با کاهش فشار آب منفذی (u) و با این فرض که تغییر وزن مخصوص خاک در اثر افت آب ناچیز است، تغییرات تنش کل (σ) ناچیز بوده و بر اساس اصل تنش موثر، تنش موثر (σ') در لایه‌های خاک افزایش می‌یابد. به صورت معادل می‌توان تصور کرد که فشار آب منفذی کاهش پیدا نکرده است، بلکه افزایش تنش کل ناشی از اعمال بار خارجی، باعث افزایش تنش مؤثر گردیده است. بار خارجی معادل با افت سطح آب زیرزمینی به اندازه h را مطابق شکل ۱ می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد

$$h = h'_1 - h_1 = h_2 - h'_2$$

$$\sigma'_{v_0} = h_1 \gamma_{sand} + h_2 (\gamma_{sat sand} - \gamma_w)$$

$$\sigma'_{v_1} = h'_1 \gamma_{sand} + h'_2 (\gamma_{sat sand} - \gamma_w)$$

$$= (h + h_1) \gamma_{sand} + (h_2 - h_1) (\gamma_{sat sand} - \gamma_w)$$

$$\Delta\sigma'_v = \sigma'_{v_1} - \sigma'_{v_0} = h \cdot \gamma_{sand} - h (\gamma_{sat sand} - \gamma_w)$$

$$= \left[\gamma_{sand} - (\gamma_{sat sand} - \gamma_w) \right] h \quad (1)$$

¹ Land Subsidence
² Consolidation

زیرزمینی است و در این پروژه امکان تأمین هزینه‌های این آزمایش‌ها میسر نبوده، پارامترهای خاکی که تأثیر کمتری بر نشست دارند، بر اساس تحقیقات انجام شده قبلی انتخاب و در مناطق مختلف، ثابت در نظر گرفته شدند (جدول ۱) [۶].

جدول ۱- مشخصات آزمایشگاهی ثابت برای نمونه‌های ریزدانه درشت دانه خاک منطقه [۶]

مشخصات لایه ریزدانه	مشخصات لایه درشت‌دانه
	$E = 70000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
$k = 10^{-8} \text{ (m/sec)}$	$k = 10^{-5} \text{ (m/sec)}$
$n = 0.4$ و $\mu = 0.30$	$n = 0.3$ و $\mu = 0.25$
	$m_v = 1.19 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{kN)}$

لایه درشت دانه طبق مشخصات جدول ۱ از ماسه متراکم (با قابلیت نشست کم) تشکیل شده است، بنابراین بیشترین نشست در لایه ریزدانه (لایه زیرین) اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه پارامترهای مدول الاستیسیته و قابلیت فشردگی حجمی در نشست تحکیمی نقش اساسی دارند، این پارامترها از طریق محاسبه بازگشتی به صورت تقریبی محاسبه می‌شوند. به این منظور پارامتر مدول الاستیسیته در مناطقی که میزان نشست آنها با استفاده از نقشه‌برداری به دست آمده است، متغیر در نظر گرفته می‌شود و میزان آن با روش محاسبه بازگشتی به دست می‌آید. سپس پارامتر m_v از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود. با جایگذاری مجدد m_v در چندین مرحله، مقدار صحیح این دو پارامتر به دست می‌آید

$$\frac{1}{m_v} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (2)$$

که در آن

m_v قابلیت فشردگی حجمی،

E مدول الاستیسیته و μ ضریب پواسن است.

۳-۵- داده‌های نقشه‌برداری

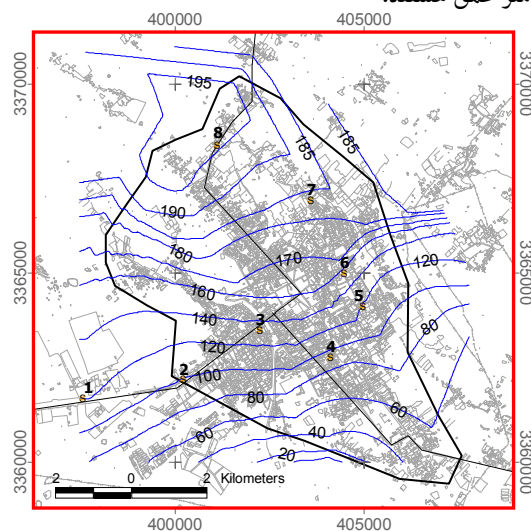
میزان نشست شهر، در تعداد معدودی نقاط مرجع سازمان نقشه‌برداری اندازه‌گیری شد. تعداد این نقاط بسیار محدود بود و صرفاً در محدوده شهری قرار داشتند. در شکل ۲، هشت نقطه انتخاب شده بر اساس شماره آنها ترسیم شده است. با تعیین موقعیت این نقاط در نرم‌افزار Arc View که از انواع نرم‌افزارهای GIS است، مشخصات لایه‌بندی زمین، سطح آب و ... در محل قرارگیری تعیین می‌گردد.

ماه این سال در نظر گرفته شد و نتایج محاسبات نشست برای سال ۱۳۸۵ و ۱۵ سال آینده (سال ۱۴۰۰) ارائه گردید. میزان افت سطح آب زیرزمینی در شهر رفسنجان تغییرات کمی دارد و بر اساس چاههای پیژومتری اطراف شهر، ۰/۶۷ متر در سال محاسبه شده است. با توجه به ممنوعیت حفر چاههای جدید و روند تقریباً یکنواخت افت آب در سالهای گذشته، محاسبات با فرض ادامه یافتن این افت در سالهای آینده، انجام شد.

۳-۳- ضخامت آبرفت و رسوبات ریزدانه

برای تعیین ضخامت آبرفت در سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی^۲ در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و نقشه تراز سنگ کف، نقشه تغییرات ضخامت آبرفت محاسبه گردیده است. بررسی این نقشه نشان می‌دهد که ضخامت آبرفت در شهر رفسنجان بین ۲۲۰ تا ۲۶۰ متر متغیر است.

پروفیل خاک حوالی شهر را می‌توان به‌طور کلی به دو لایه ریزدانه (لایه زیرین) و درشت دانه تقسیم کرد. ضخامت این لایه‌ها بر اساس تحلیل‌های ژئوفیزیک و تلفیق این داده‌ها با داده‌های زمین‌شناسی و اطلاعات پروفیل چاهها، تخمین زده شد. در شکل ۲ نقشه ضخامت لایه ریزدانه ترسیم شده است. بر اساس این نقشه مناطق شمالی شهر دارای بیشترین ضخامت لایه‌های رس با حدود ۲۰۰ متر عمق هستند.



شکل ۲- ضخامت رسوبات ریزدانه در محدوده شهر بر حسب متر و موقعیت نقاط محاسباتی

۳-۴- مشخصات آزمایشگاهی خاک

با توجه به اینکه تعیین دقیق پارامترهای مؤثر در نشست، مستلزم انجام آزمایش‌های پرهزینه ژئوتکنیک در اعماق زیر سطح آب

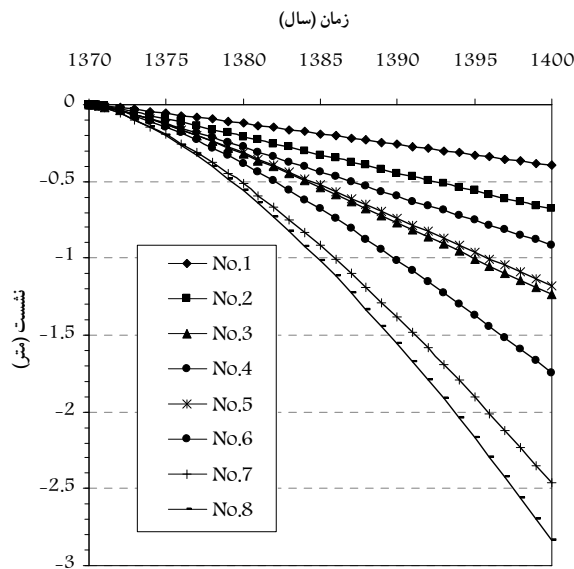
^۱ Geographic Information System (GIS)
^۲ Digital Elevation Model (DEM)

جدول ۲- اطلاعات ورودی برای نقاط مختلف شهر

ایستگاه	ضخامت کل (متر)	ضخامت ریزدانه (متر)	سطح آب (متر) سال ۱۳۸۵	سطح آب (متر) سال ۱۴۰۰	نشست در سال ۱۳۸۳ (سانتی متر)
۱	۲۰۰	۱۲۰	۷۰	۶۰	۱/۳
۲	۲۱۰	۱۰۰	۷۰	۶۰	۲/۳
۳	۲۵۰	۱۳۰	۶۵	۵۵	۴/۵
۴	۲۴۰	۹۰	۶۵	۵۵	۳
۵	۲۴۰	۱۲۰	۶۵	۵۵	۴/۱
۶	۲۶۰	۱۶۰	۶۵	۵۵	۶/۷
۷	۲۶۰	۱۸۰	۶۰	۵۰	۸/۹
۸	۲۵۰	۲۰۰	۵۵	۴۵	۱۱/۶

صورتی است که بیشترین اختلاف نشست در شهر حدود ۲/۵ متر است.

برای ترسیم دقیق تر منحنی های هم نشست در شهر، پنج نقطه کمکی بر روی مرزهای محدوده شهر انتخاب شد. پارامتر E در این نقاط بر مبنای منحنی های مدول الاستیسیته شهر که بر اساس مدول هشت نقطه قبلی ترسیم شده بود، تعیین شد و با تعیین دیگر مشخصات این نقاط در محیط GIS، میزان نشست این مناطق



شکل ۳- نمودار نشست-زمان بین سالهای ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰

محاسبه گردید. با به دست آوردن میزان نشست محاسباتی در ۱۳ نقطه، منحنی های هم نشست در سالهای مختلف قابل ترسیم است.

شکل ۴ نشست محاسباتی را در سال ۱۳۸۵ نشان می دهد. مطابق شکل ۲، نتایج به دست آمده با نقشه ضخامت لایه های ریزدانه تطابق خوبی دارد. میزان نشست در مناطق شمالی یا شمال شرقی شهر با توجه به اینکه ضخامت لایه ریزدانه زیاد است، بیشترین مقدار را دارد. قسمتهای غربی یا جنوب غربی دارای

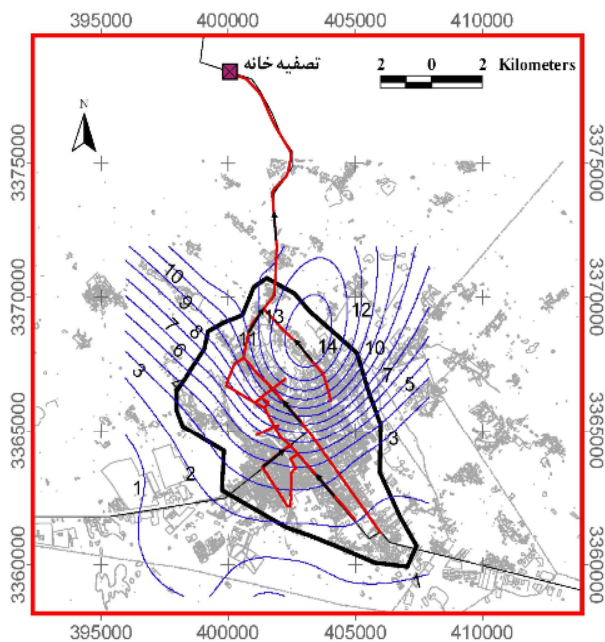
۴- مدل سازی با استفاده از روش المان های محدود

برای مدل سازی نشست تحکیمی در نقاط انتخاب شده، از نرم افزار طراحی شده در دانشگاه کرمان به منظور مدل سازی نشست بر اساس تئوری تحکیم بایوت^۱ و مدل اجزای محدود تحکیم کوپل در محیط اشباع استفاده شد [۶]. با اعمال شرایط مرزی در مدل، جابه جایی افقی در طرفین مدل و جابه جایی قائم در محل تماس خاک با سنگ بستر، صفر تعریف شد. برای انجام آنالیز نشست به روش محاسبه برگشتی در نقاط تعیین شده، ابتدا مقادیر m_v و E به صورت تقریبی وارد شد. در این مرحله میزان نشست محاسبه شده در سال سیزدهم (۱۳۸۳) که سال برداشت های نقشه برداری بود با میزان نشست های اندازه گیری شده مقایسه گردید. با توجه به اختلاف نشست محاسباتی و واقعی، مقادیر m_v و E در چندین مرحله کالیبره شد.

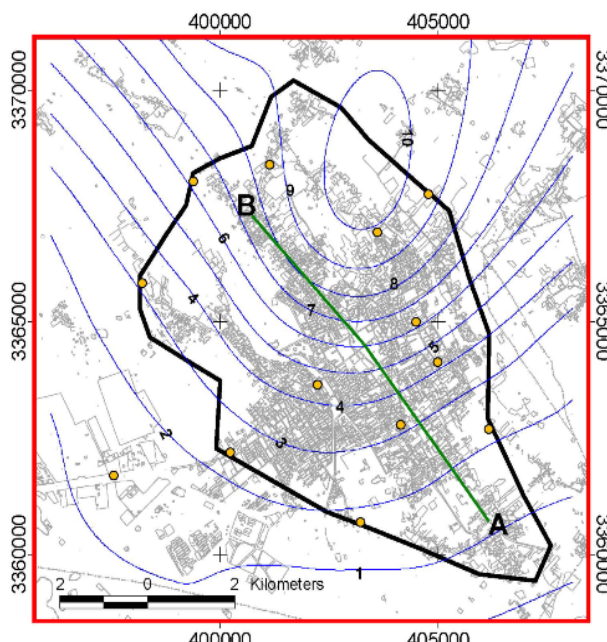
در جدول ۲ داده های ورودی مدل یعنی ضخامت لایه ها، سطح آب و میزان نشست اندازه گیری شده در هشت ناحیه شهر، مشخص شده است.

نمودار نشست-زمان برای هشت نقطه محاسبه شده در شکل ۳ ترسیم شده است. نشست زمین در ایستگاههایی که در آنها مدول الاستیسیته بالای 15000 kN/m^2 است (شماره ۱ تا ۵)، الگوی تقریباً خطی دارد. در نقاطی که پروفیل خاک آنها دارای لایه های ریزدانه با مدول الاستیسیته زیر 14000 kN/m^2 (شماره ۶ تا ۸) است، با افزایش زمان، نشست افزایش می یابد. لذا با توجه به این نمودار نقاط شمال و شمال شرقی شهر در سالهای آینده، اختلاف نشست بیشتری نسبت به دیگر مناطق شهر پیدا می کنند. بر اساس این پیش بینی حداکثر نشست بین سالهای ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰، در شمال شهر رفسنجان و به میزان ۲/۸ متر خواهد بود. این در

¹ Biot

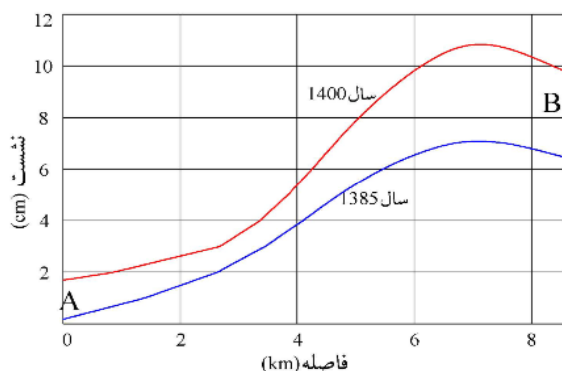


شکل ۵- منحنی های هم نشست سالیانه پیش بینی شده شهر رفسنجان در سال ۱۴۰۰ (برحسب سانتی متر)



شکل ۴- منحنی های هم نشست سالیانه شهر رفسنجان در سال ۱۳۸۵ (برحسب سانتی متر)

در مسیر اصلی فاضلاب (جنوب به شمال) در محدوده شهر، با حرکت به سمت شمال، نشست افزایش خواهد یافت. شکل ۶ می دهد. این خط لوله در سال ۱۴۰۰، بین ۳ تا ۷، اختلاف نشست به میزان ۲ سانتی متر در هر کیلومتر خواهد داشت. این در صورتی است که میزان اختلاف نشست این قسمت در سال ۱۳۸۵ کمتر از ۱/۵ سانتی متر در کیلومتر بوده است. بیشترین اختلاف نشست در این خط، طی ۱۵ سال به ۲۵ سانتی متر خواهد رسید. حداکثر میزان نشست این لوله با اجرای آن از سال ۱۳۸۵، در نقاط شمالی حدود ۱/۴ متر پیش بینی می شود که با توجه به عدم یکنواختی خاک در طول مسیر، اختلاف نشست هایی بیش از مقادیر محاسباتی ایجاد خواهد نمود.



شکل ۶- میزان نشست سالیانه در مسیر A-B مشخص شده در شکل ۴

نشست کمتری است، زیرا پروفیل خاک در این نواحی قابلیت نشست کمی دارد. بنابراین رفسنجان به دلیل واقع شدن در حد فاصل رسوبات ریزدانه و درشت دانه، دارای اختلاف نشست زیادی در محدوده شهر است.

۵- پیش بینی میزان نشست های آینده و تأثیر آن بر شبکه فاضلاب

شکل ۵ منحنی های هم نشست سالیانه را در سال ۱۴۰۰ نشان می دهد. بر اساس این شکل، حداکثر میزان نشست سالانه در مناطقی از شهر به بیش از ۱۴ سانتی متر در سال خواهد رسید. تغییرات سطح زمین در این سال در مناطق با خاک درشت دانه تغییر چندانی با سال ۱۳۸۵ ندارد (شکل ۳). ولی در مناطق شمالی شهر نشست ها افزایش خواهد یافت. بنابراین با گذشت زمان، میزان اختلاف نشست به وجود آمده در شهر افزایش خواهد یافت.

در طرح اولیه فاضلاب شهر رفسنجان مطابق شکل ۵، مسیرهای اصلی انتقال از وسط شهر و در راستای جنوب شرق به شمال غرب عبور کرده و جریان های فرعی با راستای شمال شرق به جنوب غرب یا برعکس به مسیر اصلی منتهی می شود. با توجه به روند افزایش نشست از غرب به سمت شرق شهر، در لوله هایی که جهت شرقی - غربی دارند، سمت شرقی لوله نشست بیشتری خواهد داشت.

۶- نتیجه گیری

در مطالعه موردی مناطقی که اطلاعات کمی از پارامترهای ژئوتکنیکی آنها موجود است، روش محاسبه برگشتی، یکی از ارزان ترین و کاربردی ترین روشهای مدل سازی و پهنه بندی نشست به شمار می رود. به این ترتیب با داشتن میزان افت آب و نشست زمین می توان پارامترهای خاک منطقه را به طور کلی تعیین کرد و برای محاسبه نشست در مناطق اطراف استفاده نمود. با توجه به نتایج به دست آمده در شهر رفسنجان، میزان اختلاف نشست طی ۱۵ سال در بعضی مناطق به بیش از ۲۵ سانتی متر در کیلومتر خواهد رسید. با توجه به توپوگرافی شهر و جهت خط انتقال،

۷- مراجع

- 1- Galloway, D., Jones, D.R., and Ingebritsen, S.E. (1999). *Land subsidence in the united states*, U.S. Geological Survey, Virginia. USA.
- 2- Poland, J.F. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*, UNESCO/IH, Michigan. USA.
- ۳- طباطبایی عقدا، س.ط. (۱۳۸۵). "پیش بینی و پهنه بندی نشست منطقه ای زمین در اثر برداشت آب های زیرزمینی در رفسنجان". پایان نامه کارشناسی ارشد بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.
- 4- Toufigh, M. M., and Tabatabaee Aghda, S.T (2004). "Land subsidence and its consequences of large groundwater withdrawal in Rafsanjan, Iran." Workshop on Management of Aquifer Recharge and Water Harvesting in Arid and Semi-arid Regions of Asia, International Center on Qanats, Iran, 253-261.
- 5- Khamchian, M. (1995). *Land subsidence and earth fissures due to withdrawal of groundwater in Rafsanjan plain, Iran*, Reports of Faculty of Science and Engineering, 23 (2), 81-91.
- 6- Toufigh, M. M., and Shafiei, B. (1996). "Finite element consolidation model for subsidence problem based on Biot's three dimensional theory." *Indian Geotechnical Journal*, 26(3), 1-8.