

# بررسی ناپایداریهای ژئوتکنیکی، تأثیر شرایط ساختگاهی و عملکرد پی ساختمانها در زلزله ۱۷ اوت ۱۹۹۹ ایزمیت ترکیه

محمد کاظم جعفری، استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک پژوهشگاه

## ۱- مقدمه

منشأ زمین ساختی و ژئوتکنیکی دارند. با توجه به اینکه رفتار و عملکرد پی ها بر اثر وقوع پدیده روانگرایی از شرایط ویژه و کم نظیری در زلزله ایزمیت برخوردار بوده است؛ لذا، رفتار پی ها از نظر ظرفیت باربری، نشست و چرخش پی به طور مستقل در قسمت ششم مقاله ارائه می گردد. شایان ذکر است که ارزیابی ارائه شده، تابع اطلاعات به دست آمده در حین بازدید، مذاکرات و گزارشهای شناساییهای اولیه در دسترس بوده است. بدیهی است داشتن اطلاعات دقیقتر ژئوتکنیکی مناطق آسیب دیده، تجزیه و تحلیلهای کمی تر و عمیقتر ابعاد ژئوتکنیکی را امکان پذیر می نماید.

## ۲- گسلش سطحی و تأثیر آن در رفتار ساختمانها و تأسیسات موجود در حریم گسلش

بررسیهای لرزه زمین ساختی زلزله ایزمیت ترکیه نشان می دهد که در طول خط گسل مسبب زلزله ایزمیت جا به جاییهای قابل توجه افقی، قائم و یا ترکیبی از هر دو، در سطح زمین به وقوع پیوسته است. رفتار و عملکرد ساختمانها و تأسیسات در حریم گسلش در زلزله ایزمیت نکات قابل تأملی را در بردارد که در این قسمت به اجمال مورد بررسی قرار می گیرد.

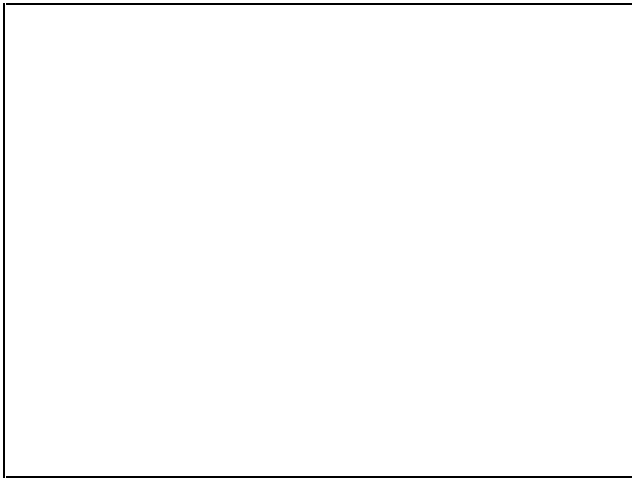
عبور خط گسل از زیر ساختمانها و تأسیسات که به تحمیل جا به جاییهای قابل توجه بر آنها منجر می گردد معمولاً خسارات عمده ای را به دنبال دارد و در زلزله ایزمیت نیز نمونه های فراوانی از این نوع خرابیهای ساختمانی مشاهده شده است. به عنوان مثال، عبور خط گسل از زیر تعدادی مجتمع مسکونی در منطقه ایزمیت (تصویر ۱) و عبور خط گسل از شهر گولجوک به تخریب ساختمانیهای احداث شده بر روی آن

ارزیابی کلی از خسارات وارده به سازه ها و مستحدهات در زلزله ۱۷ اوت ۱۹۹۹ ایزمیت ترکیه نشان می دهد که ناپایداریهای ژئوتکنیکی و شرایط ساختگاهی تأثیر قابل توجهی بر نحوه توزیع خرابیها در شهرها، روستاها و مناطق ساحلی اطراف خلیج ایزمیت و دریاچه ساپانچا (*Sapanca*) داشته است. شدت بالای زمین لرزه در مناطق آسیب دیده از یک سو و طولانی بودن مدت دوام حرکت قوی زمین از سوی دیگر (حدود ۴۵ ثانیه) در بروز ناپایداریهای ژئوتکنیکی و وارد آمدن صدمات و خسارات سنگین به ابنیه و تأسیسات نقش بسزایی داشته است. خطرهای ژئوتکنیکی در یک ساختمان عمدتاً در قالب ناپایداریهای ژئوتکنیکی و ارتعاش زمین (تأثیر ساختگاه *Site Effect*) تقسیم بندی می شوند. در بخش ناپایداریهای ژئوتکنیکی پدیده های روانگرایی و لغزش زمین مورد بررسی قرار می گیرند و ارزیابی تأثیر لایه بندی خاک در مشخصات زمین لرزه در سطح زمین از لحاظ شتاب حداکثر، محتوای فرکانسی و مدت دوام زمین لرزه موضوعات مورد بحث در بخش ارتعاش زمین می باشند.

در این مقاله، علاوه بر بررسی ابعاد ناپایداریهای ژئوتکنیکی و ارتعاش زمین در زلزله ایزمیت، به گسلشهای سطحی و آب گرفتگی مستحدهات نیز اشاره می گردد. گسلشهای سطحی (*Fault Rupture*) و جا به جاییهای نسبی در سطح زمین با منشأ زمین ساختی می توانند به عنوان عامل ناپایداری زمین و خطر لرزه ای ساختمان (*Site-Seismic Hazard*) نظیر ناپایداریهای ژئوتکنیکی موجب آسیب پذیری ابنیه و مستحدهات گردند. آب گرفتگی مستحدهات (*Inundation*) در سواحل خلیج ایزمیت و یا دریاچه ساپانچا نیز که ناشی از جا به جایی قائم گسلشهای سطحی و فرونشست زمین می باشند

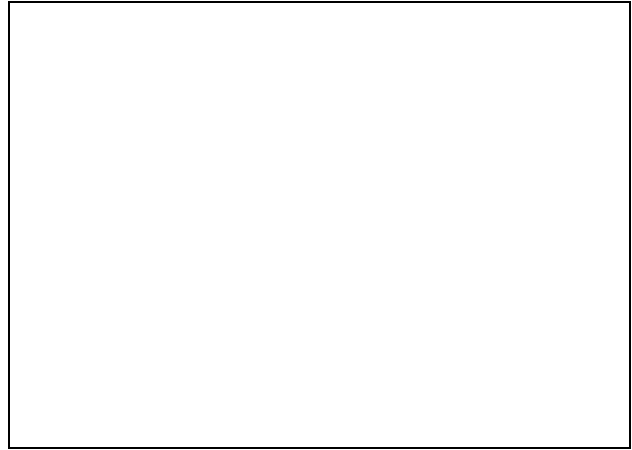


تصویر (۳): عبور خط گسل از زیر یک خانه مسکونی یک طبقه در منطقه روستایی تپه تارلا (Tepe Tarla) و آسیب دیدگی محدود



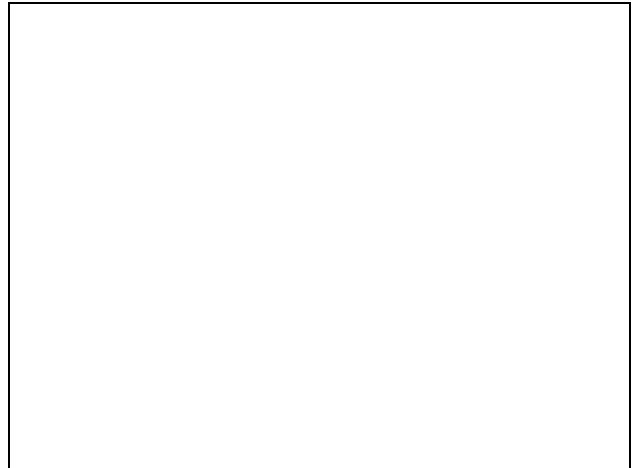
تصویر (۴): عبور خط گسل از زیر یک دکل انتقال برق نزدیک کارخانه فورد نزدیک شهر گولجوک و آسیب دیدگی محدود

جالبترین و آموزنده ترین بحث در این بخش، رفتار ساختمانهای مجاور گسلها در زلزله ایزمیت می باشد. با توجه به بازدید گروه شناسایی پژوهشگاه، در موارد متعدد آسیب و خسارات وارده به ساختمانهای مجاور گسلها جزئی و محدود ارزیابی شده است. نمونه هایی از مورد مذکور را می توان در شهرک احسانیه نزدیک کارخانه فورد (تصویر ۵) و در شهر گولجوک در نزدیکی پایگاه نیروی دریایی ارتش ترکیه مشاهده نمود (تصویر ۶). به نظر می رسد که به دلایل مختلف نظیر ساز و کار گسلش، آزاد شدن انرژی زلزله در طول زمان نسبتاً زیاد و جنس زمین این ساختمانها شتابهای بالایی را علی رغم جا به جاییهای زیاد، تحمل نکرده باشند که تبیین دقیقتر این مسأله نیاز به بررسیها و مطالعات بیشتری دارد.



تصویر (۱): عبور خط گسل از زیر یک مجتمع مسکونی و تخریب ساختمانها [۱]

منجر گردیده است (تصویر ۲). در مواردی نیز که ساختمان و یا تأسیسات سبک بر روی زمین بنا شده اند نمونه هایی مشاهده شده که عبور گسل از زیر آنها به تخریب آنها منجر نشده باشد (تصویر ۳ و ۴).

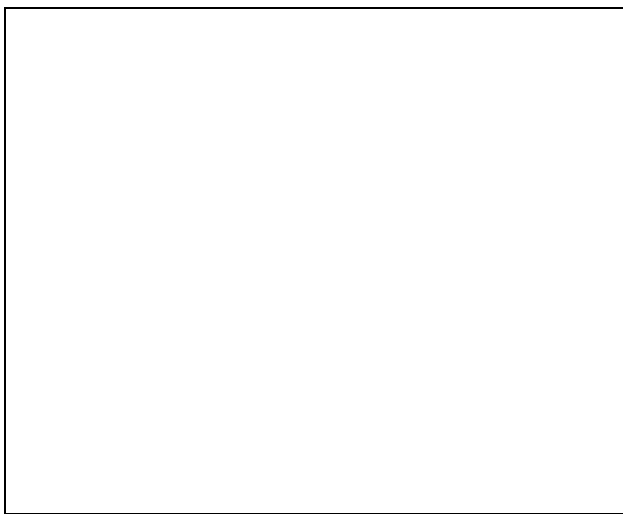


تصویر (۲): عبور خط گسل از زیر تعدادی مجتمع مسکونی در شهر گولجوک و تخریب ساختمانها (هر دو تصویر از بالای یک ساختمان گرفته شده اند)

و آسیب دیدگی مستحذات در مناطق زلزله زده، تأثیر تعیین کننده شرایط خاک از نظر نوع، لایه بندی، ضخامت و سطح آب زیرزمینی در بروز و نمود خسارتهای وارده در زلزله ایزمیت را نشان می دهند.

ناپایداریهای عمده در سواحل خلیج ایزمیت، دریاچه ساپانچا و تخریب یا آسیب دیدگی ساختمانها در نواحی ساحلی (که به نمونه هایی از آن در بخش آب گرفتگی اشاره خواهد گردید)، چرخش بسیار زیاد ساختمانها ناشی از شکست ظرفیت باربری پی ها و یا نشست و چرخشهای قابل توجه در ساختمانها در محدوده ای از شهر آداپازاری در تصویر (۷) و تخریب ساختمانها در بخشهایی از شهر گولجوک که عمدتاً به دلیل نزدیکی و یا روی گسل بودن آنهاست در تصویر (۸) مشاهده می گردند.

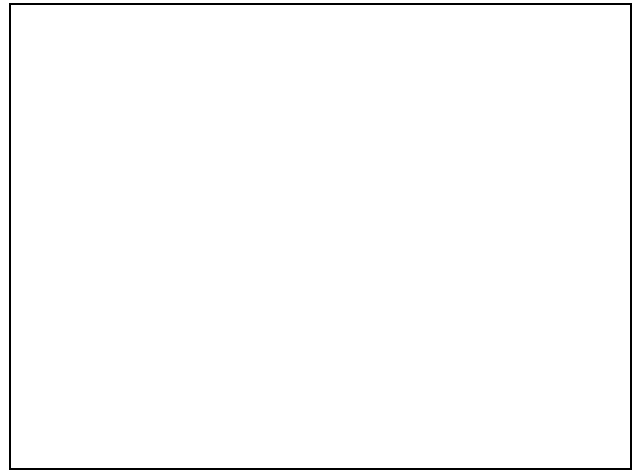
آسیب دیدگیهای جدی ساختمانها در بخش محدودی از شهر یالوا در



تصویر (۷، الف): عکس هوایی از منطقه شدیداً آسیب دیده [۱]



تصویر (۷، ب): تخریب ساختمانها در محدوده بلوار ایزمیت در شهر آداپازاری (تأثیر شرایط ساختمانی و ناپایداریهای ژئوتکنیک)



تصویر (۵): آسیب دیدگی بسیار محدود به خانه ای در مجاورت گسل با جا به جایی قائم حدود دو متر (شهرک احسانیه نزدیک کارخانه فورد)



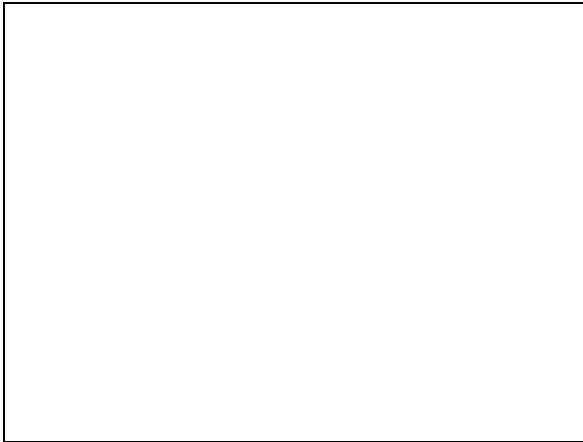
تصویر (۶): آسیب دیدگی محدود ساختمان در مجاورت گسل امتداد لغز با جا به جایی حدود دو متر که باعث جلو آمدگی ساختمان انتهایی تصویر نسبت به ساختمانهای جلوتر شده است (شهر گولجوک در نزدیکی پایگاه نیروی دریایی ارتش ترکیه)

### ۳- شرایط ساختمانی (Site Conditions)

تخریب و آسیب دیدن ساختمانها و تأسیسات در زلزله ایزمیت نشان- می دهد که علاوه بر وجود مسائل و مشکلات در طراحی و اجرای آنها، عامل شرایط ساختمانی نقش تعیین کننده ای را در توزیع خرابیها در منطقه آسیب دیده ایفا نموده است. اگر در یک برداشت عمومی تر از مفهوم تأثیر شرایط ساختمانی علاوه بر معنای مصطلح آن در مباحث ژئوتکنیک لرزه ای که به بررسیهای مربوط به تأثیر ساختمانی در نحوه ارتعاش زمین و مشخصات حرکات قوی در سطح زمین می پردازد، تمامی عوامل زمین شناسی و ژئوتکنیکی نظیر ناپایداریهای ژئوتکنیکی را نیز در نظر بگیریم، توزیع نامتقارن و تنوع خرابیها

#### ۴- روانگرایی (Liquefaction)

پدیده روانگرایی در زمین لرزه های شدید بر اثر کاهش مقاومت خاک اشباع به دلیل بالا رفتن فشار آب منفذی و کاهش تنش مؤثر در خاک به وقوع می پیوندد. خاکهای طبیعی با تراکم کم و یا خاکریزهای متراکم نشده و یا کم متراکم شده که در گروه خاکهای ماسه ای یا



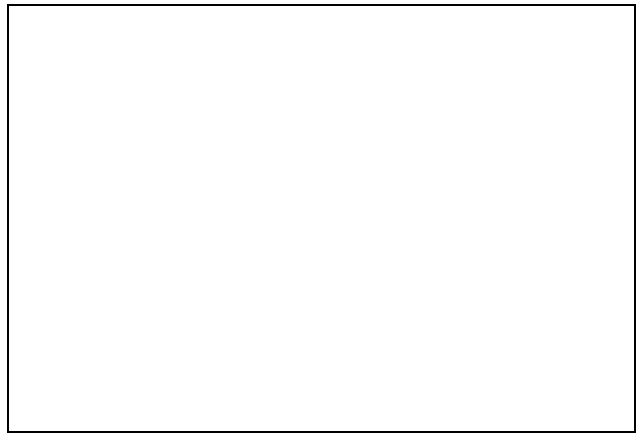
تصویر (۱۰): تخریب موضعی ساختمانها در منطقه ارجی لرستانبول بر اثر تأثیر شرایط ساختگاهی [۱]

سیلتی - ماسه ای قرار می گیرند دارای توان روانگرایی می باشند. خاکهای رس معمولاً دارای توان بالایی روانگرایی نیستند مگر اینکه از نوع بسیار حساس باشند.

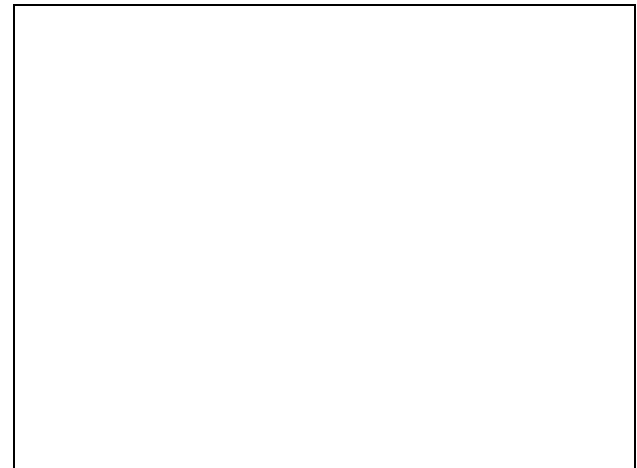
وقوع روانگرایی در یک یا چند نقطه محدود در زمین به تنهایی برای مستحذات روی زمین مشکل آفرین نمی باشد و تنها در صورتی که روانگرایی در یک توده زمین یا خاکریز در یک شیب، محدوده متأثر پی در ظرفیت باربری، محدوده گوه محرک بر روی ابنیه نگهبان و نظایر آن گسترش یابد می تواند به ایجاد ناپایداری مستحذات، نشست و یا چرخش قابل توجه آنها منجر گردد.

در زلزله ایزمیت پدیده روانگرایی در بعضی از مناطق نظیر سواحل خلیج ایزمیت، دریاچه ساپانچا و شهر آداپازاری به صورت گسترده ای عامل ایجاد انواع ناپایداریها نظیر لغزش توده ای شیبها، شکست باربری پی ها و نشست یا چرخش پی ساختمانها شده است. با توجه به گستردگی وقوع این پدیده در نقاط مورد بازدید، هر یک از این موارد جداگانه مورد بررسی قرار می گیرند و در اینجا فقط به معرفی نمونه هایی از مقاطع خاک در شهرهای آداپازاری، ایزمیت و یالوا و معرفی پدیده جوشش ماسه به طور نمونه در شهر آداپازاری اکتفا می شود.

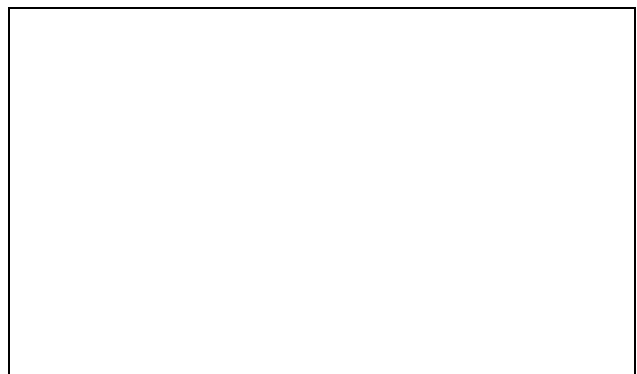
تصویر (۹) و خرابیها و آسیب دیدگیهای موردی در شهرهای مختلف بویژه منطقه آوجی لر استانبول ناشی از تأثیر ساختگاه از نظر ارتعاش زمین در تصویر (۱۰) مشاهده می گردد، که نمونه هایی از تأثیر شرایط ساختگاهی در نقاط مختلف مناطق زلزله زده را نشان می دهند.



تصویر (۸، الف): عکس هوایی از شهر گولجوک پس از وقوع زمین لرزه ایزمیت [۱]



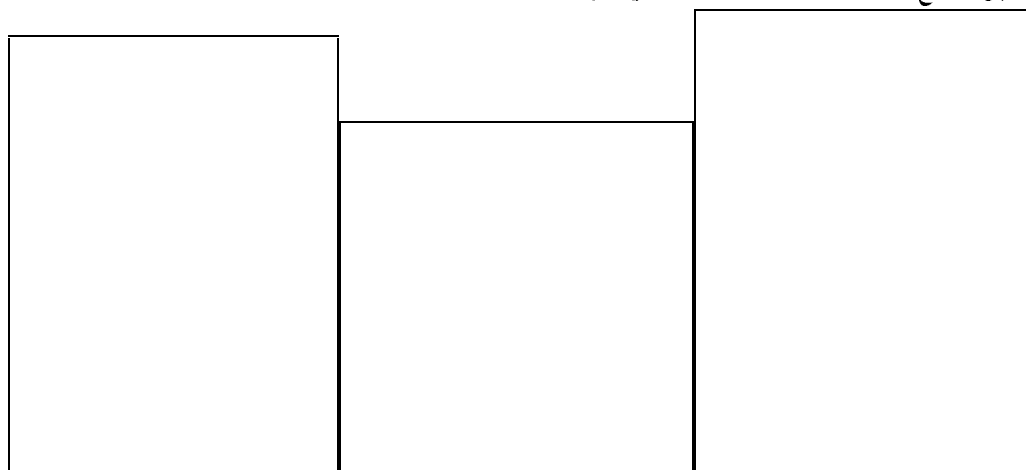
تصویر (۸، ب): تخریب ساختمانها در نزدیکی گسل در شهر گولجوک



تصویر (۹): تخریب موضعی ساختمانها در شهر یالوا (تأثیر شرایط ساختگاهی) [۱]

شهر آداپازاری که عمدتاً از نهشته های آبرفتی پوشیده شده است به دلیل وقوع گسترده پدیده روانگرایی در زلزله ایزمیت خسارات بسیاری را متحمل شد. در بازدیدهای به عمل آمده توسط گروه مطالعاتی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله نمونه هایی از تخریب، نشست و چرخش ساختمانها در این شهر مورد بررسی قرار گرفتند. نکته قابل توجه در این مورد این است که وقوع پدیده روانگرایی در شهر آداپازاری نقش عمده ای را در استهلاک انرژی زلزله و آسیب پذیری کمتر ساختمانها علی رغم کیفیت پایین ساخت و ساز، ایفا نموده است. نمونه هایی از مقطع خاک در این شهر می تواند روشنگر عوامل مؤثر در خرابیهای گسترده شهر آداپازاری باشند (تصویر ۱۱). گمانه های I-5 و I-19 در قالب طرح فاضلاب شهر آداپازاری در خیابان کارک (Cark) در محدوده جنوبی شهر آداپازاری، جایی که صدمات سازه ای عمده ای وارد شده، حفر گردیده اند. در گمانه I-5 خاک سیلنتی غیرپلاستیک در زیر خاک دستی و رس سیلنتی دیده می شود و مقدار SPT تا عمق حدود چهار متری کمتر از ۱۰، گزارش شده است. در زیر این لایه در عمق حدود پنج متری لایه ماسه شن دار با وضعیت متراکم وجود دارد. ذکر این نکته مفید به نظر می رسد در صورتی که انتقال بار ساختمانها به گونه ای به این لایه متراکم صورت می پذیرفت (بر خلاف وضعیت غالب که عمدتاً پی ها به دلیل تراز بالای آب زیرزمینی نزدیک سطح زمین مستقر شده اند) ناپایداری ژئوتکنیکی ناشی از شکست ظرفیت باربری بشدت کاهش می یافت. بررسی رفتار پی ها به صورت تفصیلی در بخش ششم ارائه خواهد گردید. گمانه I-19 در نزدیکی ساختمان شهرداری، که آسیب جزئی دیده، حفر شده است. در این مقطع نشان داده شده است که وضعیت بافت

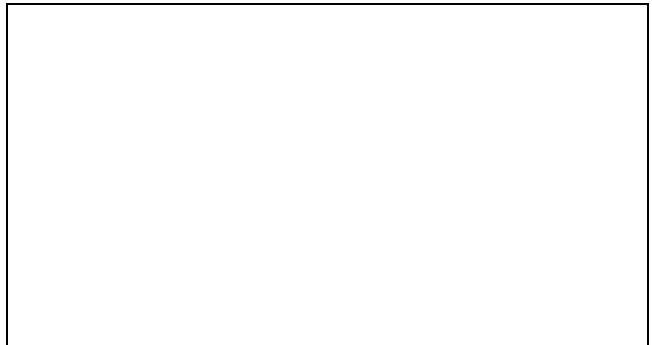
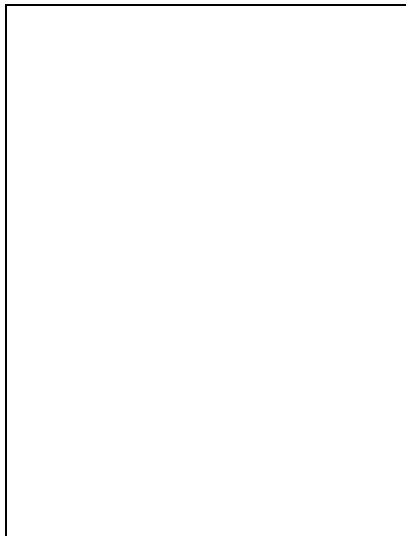
تحت الارضی در این نقطه تا حدی مناسبتر از محل قبلی است که می تواند دلیل اصلی برای خسارت کمتر به ساختمان شهرداری بوده باشد. در گمانه B6 که برای طرح مرکز صنعتی شهر آداپازاری حفر شده است سیلت و ماسه کم تراکم تا عمق حدود ۱۰ تا ۱۴ متری وجود دارد که از نظر شرایط بافت تحت الارضی شباهت زیادی با بافت خاک مناطق با خسارت سنگین شهر آداپازاری در زلزله ایزمیت دارد. سطح آب زیرزمینی در گمانه ها از یک تا سه متر متغیر است که از دو رودخانه در منطقه و دریاچه ساپانچا تغذیه می شوند. در محدوده های روانگرا شده در شهر آداپازاری نیز موارد متعددی از پدیده جوشش ماسه مشاهده شده است که نمونه هایی از آن در تصویر (۱۲) ارائه شده اند. پدیده روانگرایی در شهرهای ایزمیت و یالوا به صورت آنچه در شهر آداپازاری به وقوع پیوسته است موضوعیت ندارد؛ لیکن، در این مقاله به منظور اطلاع از بافت تحت الارضی، نمونه هایی از لایه بندی خاک در این دو شهر ارائه می گردد. در شهر ایزمیت که در کنار خلیج ایزمیت قرار دارد تأثیر شرایط زمین شناسی و بافت تحت الارضی در رفتار ساختمانها بوضوح قابل رؤیت است. تعدادی از ساختمانها نشست و یا دوران محدود داشته اند. در اینجا فقط به ذکر نمونه ای از بافت تحت الارضی در نزدیکی ساحل خلیج ایزمیت (شکل ۱۳، گمانه S5) اکتفا می گردد. این شکل نشان می دهد که تا عمق حدود ۳۰ متری بافت خاک را رس آلی نرم تشکیل داده است و سطح آب زیرزمینی در حدود عمق یک متری قرار دارد. اگرچه توان وقوع پدیده روانگرایی در این نوع خاکها کم است، ولی نشست خاک در حین وقوع زمین لرزه و یا نشست تحکیمی پس از وقوع زمین لرزه بر اثر استهلاک فشار آب



تصویر (۱۱): نمونه هایی از مقاطع ژئوتکنیکی خاک در شهر آداپازاری [۱]



تصویر (۱۲، الف): پدیده جوشش ماسه بر اثر وقوع روانگرایی در شهر آداپازاری



تصویر (۱۲، ب): پدیده جوشش ماسه بر اثر وقوع روانگرایی در شهر آداپازاری [۱]

تصویر (۱۳): نمونه هایی از مقاطع ژئوتکنیکی خاک در شهر ایزمیت و یالوا [۱]

منفذی احتمالی، می تواند منشأ نشست و چرخش محدود ساختمانها بوده باشد.

در شهر یالوا نیز خرابیهای سنگینی در منطقه چیفتلکوی (Ciftlikkoy) مشاهده شد. گمانه حفر شده در این منطقه (تصویر ۱۳، گمانه SKI) برای طرح مخبراتی شهر، نشان می دهد که یک لایه ماسه ای به ضخامت پنج متر در زیر لایه سطحی رسی قرار دارد و سطح آب زیرزمینی نیز بالا می باشد. در زیر لایه ماسه ای نیز لایه های سیلتی و رسی قرار دارند که رفتار مجموعه لایه های مختلف در زلزله به نحوی بوده است که ساختمانهای پنج و یا شش طبقه در این محدوده آسیب جدی دیده اند؛ در حالی که، ساختمانهای با طبقات کمتر خسارات محدودتری را تحمل نموده اند.

شیبهای کم واقع بر روی خاکهای روانگرا شده به وقوع می پیوندد. ارتعاش ناشی از زمین و اعمال نیروهای اینرسی ناشی از زمین لرزه، پایداری شیب را که دارای مصالح با توان روانگرایی است به مخاطره می اندازد. ناپایداریهای به وقوع پیوسته در حین زمین لرزه در این حالت باعث حرکت توده خاک در جهت شیب می گردد که می تواند محدوده بسیاری را متأثر نماید. این جا به جایی از چند سانتیمتر تا چندین متر را می تواند شامل گردد و از مؤلفه های افقی و قائم تشکیل شده است. پدیده لغزش روانه زمین (Flow Slide) که یکی دیگر از پدیده های پایداری شیبها به شمار می آید معمولاً در خاکهای روانگرا شده و در شیبهای تندتر اتفاق می افتد. جا به جایی توده زمین در این حالت بسیار

### ۵- ناپایداری با گسترش جانبی، لغزش روانه زمین و آب گرفتگی

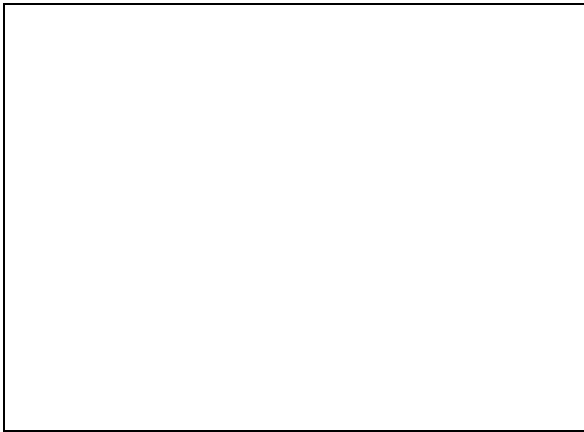
ناپایداری با گسترش جانبی (Lateral Spreading) معمولاً در

زیادتر از حالت قبلی و حتی تا دهها و صدها متر را نیز می‌تواند شامل گردد که در پدیده‌های ناپایداریهای ژئوتکنیکی ناشی از روانگرایی بیشترین خطرها را متوجه محیط اطراف خود خواهد نمود. پدیده لغزش روانه زمین برخلاف پدیده ناپایداری با گسترش جانبی که ناشی از اعمال نیروهای اینرسی بر توده خاک با توان روانگرایی و ایجاد جا به جاییهای محدودتر در آن است، وقتی اتفاق می‌افتد که نیروهای ثقلی بر روی شیب از مقاومت مصالح در بخش روانگرا شده شیب تجاوز- نماید و به "لغزش" بخشی از توده خاک بر روی بخشی دیگر منجر شود.

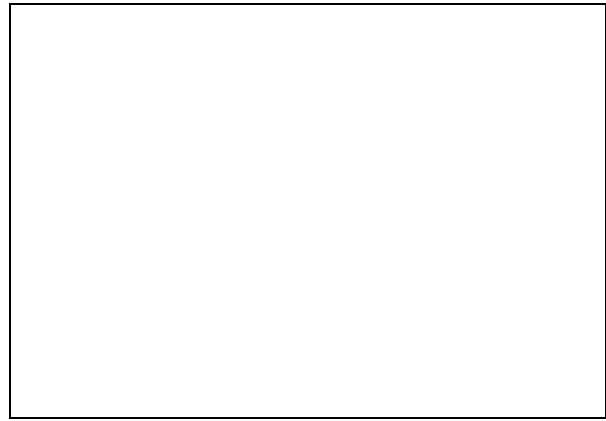
با توجه به اینکه عمده ناپایداریها و جا به جاییهای زمین در نواحی ساحلی خلیج ایزمیت و دریاچه ساپانچا به وقوع پیوسته است، عامل روانگرایی در نواحی ساحلی با توجه به بافت کم تراکم سیلنتی و ماسه سیلنتی در نواحی آسیب دیده از یک طرف و بالا بودن سطح آب از طرف دیگر، در وقوع ناپایداریهای ژئوتکنیکی نقش اساسی داشته- است که در قالب یکی از دو مورد مذکور، ناپایداری با گسترش جانبی و لغزش روانه زمین، می‌تواند تفسیر گردد. به عنوان مثال، در مناطق ساحلی شهر گولجوک و شهر دگریمن دره (Degrimenderee) در سواحل خلیج ایزمیت پدیده ناپایداری زمین با توجه به مقادیر جا به جایی مشاهده شده، ترکیبی از ناپایداریهای با گسترش جانبی و لغزش روانه زمین می‌تواند ارزیابی گردد (تصویر ۱۴). این ناپایداریها به نشست و چرخش ساختمانها به سمت خلیج و بالا آمدن آب تا طبقات بالاتر ساختمان و حتی در مواردی جا به جایی کشتی به سمت ساحل منجر- شده است (تصویر ۱۵). در یک مورد دیگر از این ناپایداریها در منطقه ساحلی شهر دگریمن دره (تصویر ۱۶) بخشی از ساحل که مستحدثاتی نظیر رستوران و هتل بر روی آن احداث شده بودند کاملاً به درون خلیج ایزمیت لغزیده است که با توجه به جا به جایی بسیار زیاد آن می‌تواند به عنوان یک لغزش روانه زمین ارزیابی گردد. در این تصویر، عکس هوایی منطقه ساحلی قبل از وقوع زمین لرزه (که توسط گروه شناسایی پژوهشگاه درحین بازدید از یک مغازه عکاسی تهیه شده بود) و عکس هوایی و زمینی از منطقه مورد نظر نشان داده شده اند.

منشأ بالا آمدن آب در ساحل اگر علاوه بر پدیده وقوع ناپایداریهای ژئوتکنیکی، جا به جایی قائم ناشی از گسلش نیز باشد، این پدیده در قالب آب گرفتگی (Inundation) تقسیم بندی شده است. آب گرفتگی لوناپارک شهرک احسانیه در نزدیکی کارخانه فورد یکی

تصویر (۱۴): ناپایداریهای با گسترش جانبی و لغزش روانه زمین در نواحی ساحلی شهرهای گولجوک و دگریمن دره تصویر پایین [۱]



تصویر (۱۶، الف): لغزش روانه زمین در شهر دگریمین دره (عکس هوایی منطقه قبل از وقوع زلزله)



تصویر (۱۵): ناپایداریهای با گسترش جانبی و لغزش روانه زمین در نواحی ساحلی شهر دگریمین دره و جا به جایی کشتی به سمت ساحل [۱]



تصویر (۱۶، ب): لغزش روانه زمین در شهر دگریمین دره (عکس هوایی منطقه بعد از وقوع زلزله) [۲]

از این موارد است که جا به جایی قائم زمین بر اثر گسلش با راستای شرقی- غربی در نزدیکی ساحل و فرونشست صفحه شمالی گسل در درون آب به مقدار حدود دو متر، علاوه بر نشست و لغزش ناشی از ناپایداریهای ژئوتکنیکی، به عمق آب گرفتگی حدود پنج تا هشت متر مستحادثات در منطقه لوناپارک منجر شده است (تصویر ۱۷).

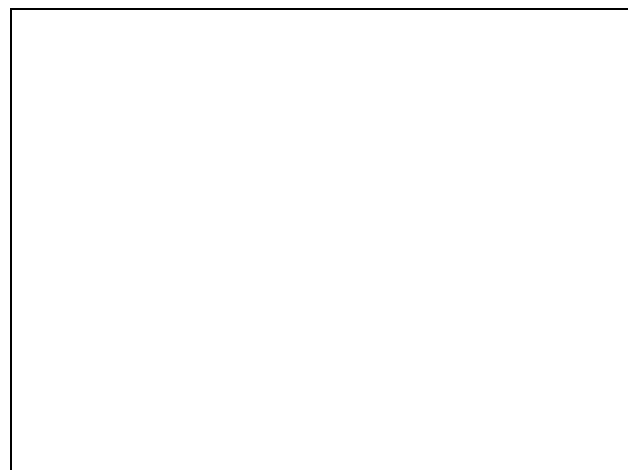
اطلاعات در دسترس بر اساس بررسیها و گزارشهای گروههای مختلف شناسایی نشان می دهد که پدیده زمین لغزه (Landslide) و لغزش زمین با منشأ خاک غیرروانگرا، در زلزله ایزمیت به وقوع- نیبوسته است. در بررسیهای هوایی که توسط برخی از گروههای شناسایی مناطق آسیب دیده صورت پذیرفته است اشاراتی به وقوع احتمالی زمین لغزه شده است که تأیید قطعی آنها به بررسیهای بیشتر زمینی نیاز دارد.

## ۶- رفتار پی ها

رفتار پی ها در این مقاله در دو بخش شکست ظرفیت باربری پی ها و نشست و چرخش پی ها مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرد.

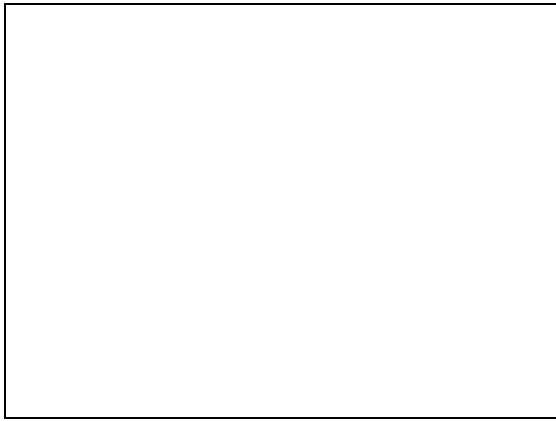
### ۶-۱- شکست ظرفیت باربری پی ها

وقوع پدیده روانگرایی گسترده در لایه های سطحی زمین در زمین لرزه ایزمیت به شکست ظرفیت باربری پی های سطحی ساختمانها و نشست یا چرخش قابل توجه آنها در مناطق شدیداً آسیب دیده نظیر شهر آداپازاری منجر شده است. افزایش فشار آب منفذی در محیط های اشباع بر اثر وقوع زمین لرزه حتی اگر به روانگرایی کامل هم منجر نگردد، می تواند به دلیل تأثیر آن در کاهش مقاومت خاک، ظرفیت باربری پی را تقلیل دهد و پایداری ساختمان را دچار مشکل- نماید. امکان شکست ظرفیت باربری یک پی سطحی به عمق لایه خاک



تصویر (۱۶، ب): لغزش روانه زمین در شهر دگریمین دره (عکس زمینی منطقه بعد از وقوع زلزله)

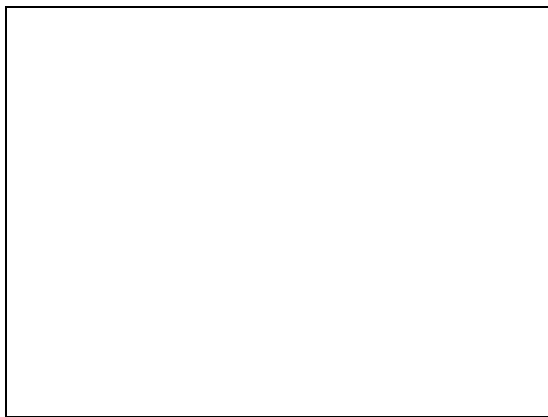




تصویر (۱۸): شکست کلی ظرفیت باربری پی گسترده با چرخش حدود ۹۰° در شهر آداپازاری

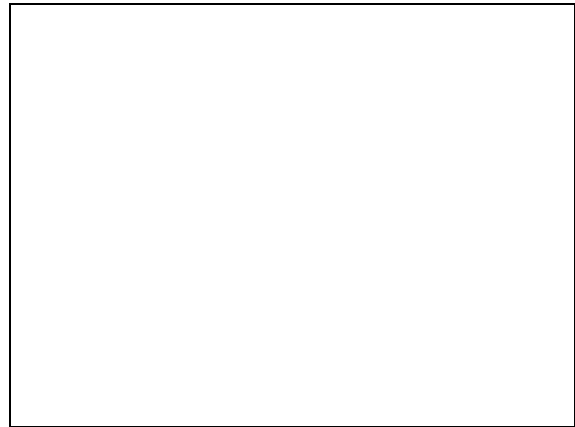


تصویر (۱۹): شکست کلی ظرفیت باربری پی گسترده با چرخش بیش از ۴۵° در شهر آداپازاری



تصویر (۲۰): شکست کلی ظرفیت باربری پی های گسترده دو ساختمان مجاور با چرخش کمتر از ۴۵° در شهر آداپازاری

به سمت بالا حرکت کرده و باعث بالآآمدگی کف اتاقها (تصویر ۲۱) و یا پیاده‌روها (تصویر ۲۲) شده است. بالآآمدگی پیاده‌روها می‌تواند بر اثر نشست زیاد پی های گسترده ساختمانهای مجاور نیز به وقوع پیوسته باشد که در موارد مشاهده شده و یا گزارش شده تعیین نوع پی نیاز به بررسیهای بیشتری دارد.



تصویر (۱۷): آب گرفتگی لونا پارک شهرک احسانیه در نزدیکی کارخانه فورد ناشی از جا به جایی های قائم با منشأ زمین ساختی و ناپایداری ژئوتکنیکی

روانگرا شده به طور کامل یا محدود در زیر پی، ابعاد پی و مقدار بار وارده از طرف پی بستگی دارد. به عنوان مثال، اگر پی های کوچک با بار کم با فاصله نسبتاً مناسبی از لایه روانگرا قرار گرفته باشد پدیده شکست ظرفیت باربری به وقوع نمی پیوندد. ارزیابی ظرفیت باربری پی های سطحی در چنین شرایطی باید با ارزیابی مقاومت لایه های خاک روانگرا شده کامل یا محدود و دیگر لایه های روانگرا نشده صورت پذیرد که نیاز به اطلاعات تکمیلی دارد. در مورد پی های عمیق (شمع ها) و ابنیه نگهبان نیز این اطلاعات برای برآورد مقاومت باربری اصطکاکی و انتهای پی و یا برآورد فشار خاک و ارزیابی پایداری آنها درحین وقوع لرزه ضروری است.

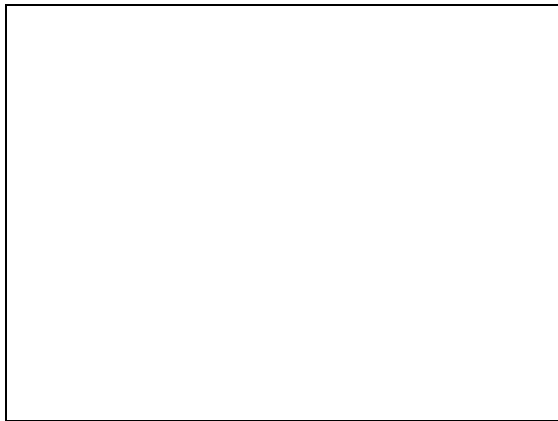
در زمین لرزه ایزمیت ترکیه، پدیده شکست ظرفیت باربری پی های سطحی به طور گسترده ای در شهر آداپازاری به وقوع پیوسته است که شاید در تعداد و تنوع آن در زلزله های بزرگ قرن بیستم کم نظیر باشد. بالا بودن سطح آب زیرزمینی در مناطق شدیداً آسیب دیده شهر آداپازاری ظاهراً دلیل اصلی استفاده از پی های سطحی و بالای سطح آب به منظور احتراز از مشکلات اجرایی احداث پی در زیر سطح آب بوده است که به استقرار پی ساختمانها بر روی لایه های خاک سیلتی و ماسه ای کم تراکم و اشباع منجر شده است. روانگرا شدن لایه های فوقانی در زیر پی ساختمانها که به دلیل شدت بالای زمین لرزه و طولانی بودن مدت دوام آن به طور گسترده ای در شهر آداپازاری به وقوع پیوسته است باعث کاهش یا از دست دادن ظرفیت باربری پی ها در تعدادی از ساختمانها و به چرخش آنها حتی تا ۹۰° منجر شده است (تصاویر ۱۸ الی ۲۰). در پی های غیر گسترده (منفرد یا نواری) شکست از نوع برش سوراخ کننده (Punching) بوده و خاک سست روانگرا شده، از طرفین پی، داخل یا بیرون از ساختمان،



تصویر (۲۲، الف): شکست کلی ظرفیت باربری و بالا آمدگی خاک در سمت پیاده رو، شهر دگریمن دره

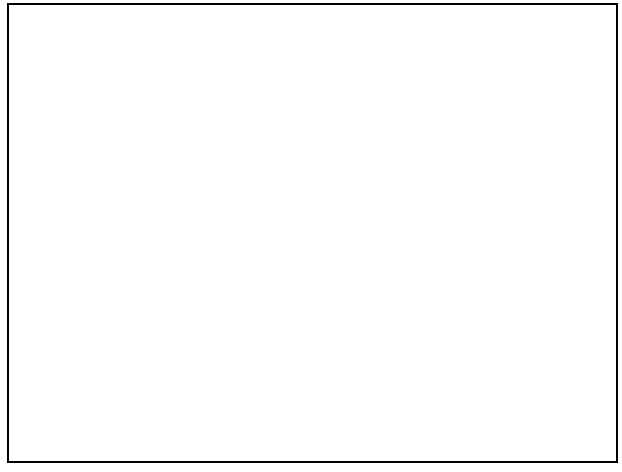


تصویر (۲۲، ب): شکست کلی ظرفیت باربری پی و بالا آمدگی خاک در سمت پیاده رو در شهر آداپازاری [۳]



تصویر (۲۳): بانک زراعت در شهر آداپازاری که به دلیل احداث ساختمان بر روی شمع، آسیب ندیده است [۳]

نشان می دهند که تنها در موارد اندکی بدین امر مبادرت شده است. در بازسازی آتی این شهر باید بحث پی سازی متناسب با بافت تحت الارضی و یا بهبود شرایط خاک پی بر اساس امکانات محلی و ارزیابیهای اقتصادی



تصویر (۲۱): شکست کلی ظرفیت باربری پی غیرگسترده و بالا آمدگی خاک در زیر کف اتاقها در شهر آداپازاری (تصویر پایین از مرجع [۳])

در مورد رفتار ساختمانها بر روی شمعها، اگرچه بررسی این موضوع در حین بازدید از مناطق آسیب دیده توسط گروه تحقیق پژوهشگاه میسر نگردیده است، لیکن بر اساس گزارشهای منتشره سایر گروههای شناسایی [۳]، ساختمان بانک زراعت در شهر آداپازاری که از محدود ساختمانهای احداث شده بر روی شمع بوده، آسیب ندیده است (تصویر ۲۳). با توجه به اینکه در بخشهای قابل توجهی در این شهر، لایه های متراکم خاک با  $SPT$  بالا در اعماق نسبتاً کم وجود دارد و نظر به اینکه وقوع پدیده روانگرایی، البته در وسعت بسیار کمتر، در زمین لرزه سال ۱۹۶۷ شهر آداپازاری آسیب پذیری پی های سطحی را در زلزله های قویتر هشدار داده بود، مشاورین و پیمانکاران محلی باید برای تأمین پایداری مناسب پی ساختمانها و تقلیل خسارات محتمل وارده، از این لایه های متراکم قوی خاک استفاده و به کمک شمعهای بتنی یا حتی ستونهای سنگی بار ساختمانها را به آنها منتقل می کردند که متأسفانه شواهد موجود

توسط مسؤولین ذی ربط در شهر آداپازاری ملحوظ گردد.

در مورد ابنیه نگهبان نیز عمده ناپایداریهای گزارش شده مربوط به دیواره های ساحلی در اسکله ها، بنادر و جاده های ساحلی می باشد. روانگرایی خاک در پشت و یا زیر دیواره ها ضمن افزایش فشار وارد بر دیواره ها، باعث ناپایداری آنها شده و به لغزش، جا به جایی و دوران دیواره ها منجر می شود (تصویر ۲۴، الف و ب). در مورد خاکهای مسلح رفتار و عملکرد گزارش شده از آنها رضایت بخش می باشد. در تصویر (۲۵) مشاهده می گردد که علی رغم تغییر شکل و نشست محدود، پایداری کلی این ابنیه نگهبان تأمین شده است.

#### ۶-۲- نشست و چرخش پی ها

نشست و یا چرخش پی ها بر اثر وقوع زمین لرزه در لایه های خاک روانگرا شده می تواند از سه مؤلفه ذیل تشکیل گردد.

#### الف) نشست در حین وقوع زمین لرزه

این نشست ناشی از روانگرایی خاک و به دلیل شکست ظرفیت باربری پی می باشد.

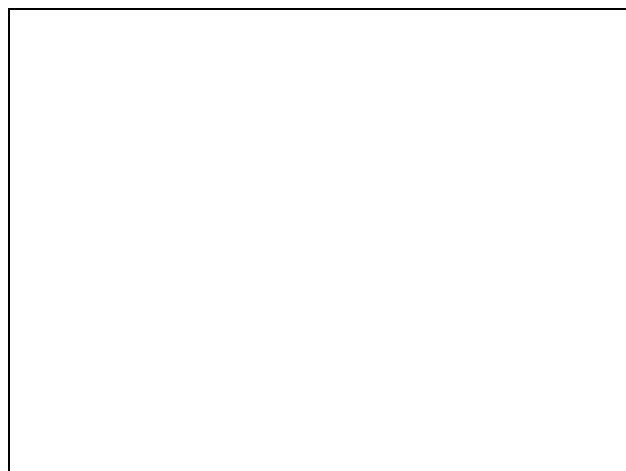
#### ب) نشست پس از وقوع زمین لرزه

نشست پس از وقوع زمین لرزه ناشی از استهلاک افزایش فشار آب منفذی و زهکشی آب با گذشت زمان می باشد. نشستهای مذکور که در زیر سطح آب زیرزمینی اتفاق می افتد، می تواند با توجه به تغییرات جانبی لایه بندی و تراکم، غیر یکنواخت باشد و به چرخش پی نیز منجر گردد. معمولاً نشست نوع دوم کمتر و یکنواخت تر از نشست نوع اول می باشد.

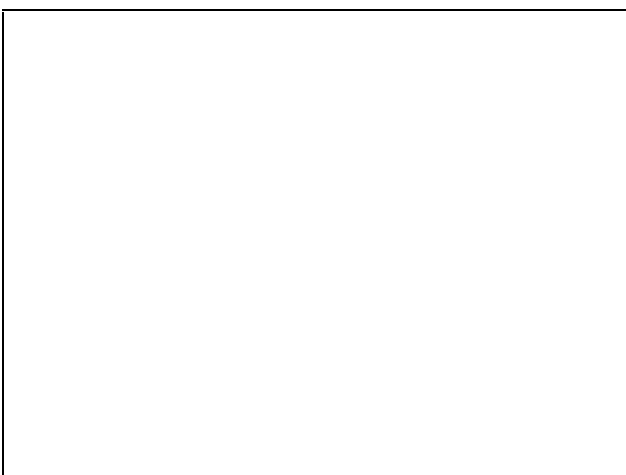
#### پ) نشست ناشی از متراکم شدن لایه های خاک غیر اشباع

علاوه بر نشست لایه های خاک در بخش اشباع، خاکهای دانه ای با تراکم کم در بالای سطح آب نیز در حین وقوع زمین لرزه به متراکم شدن تمایل دارند که عمدتاً به دلیل جا به جایی دانه ها از وضعیت تراکم کم به شرایط متراکم تر بر اثر اعمال کرنش برشی ناشی از زلزله است. وقوع این نوع نشست در خاکهای دستی نیز که به نحو مناسب متراکم نشده باشد امکان پذیر است.

در زمین لرزه ایزمیت نشست و یا چرخشهای قابل توجه مشاهده شده در ساختمانها می توانند ترکیبی از سه مؤلفه مذکور باشند که عمده ترین آن را هم می توان نشست ناشی از کاهش یا از دست دادن ظرفیت باربری به شمار آورد. تصاویر (۲۶ الی ۳۰) نمونه هایی از نشست و چرخش پی ها را در شهر آداپازاری نشان می دهند. بدیهی است بر آورد دقیق مقادیر هر یک از مؤلفه های نشست که بدانها اشاره شده است نیازمند داشتن اطلاعات کافی از بافت تحت الارضی و بارگذاری ناشی از زلزله در این نقاط می باشد.

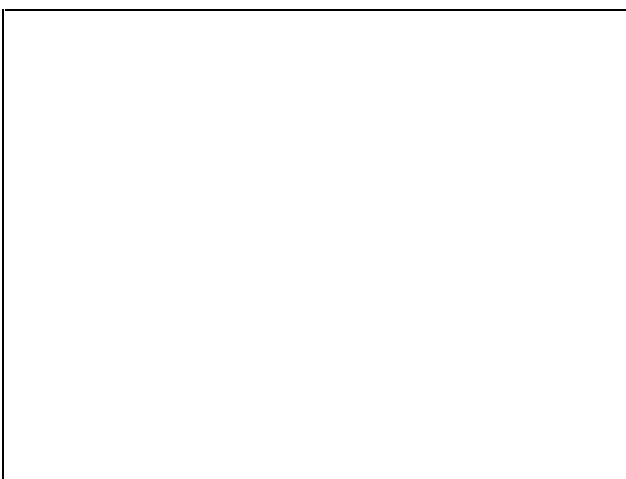


الف



ب

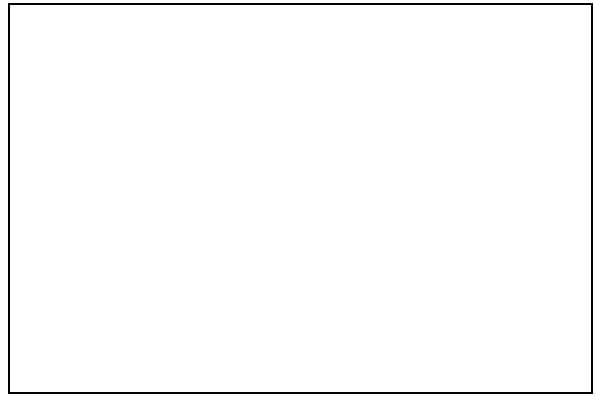
تصویر (۲۴): لغزش دیواره ساحلی به درون خلیج ایزمیت در غرب شهر گولجوک که منجر به نشست و یا چرخش ساختمانها (شکل الف) و یا مخازن ایستگاه گاز (شکل ب) شده است [۲]



تصویر (۲۵): عملکرد مناسب ابنیه نگهبان با استفاده از خاکهای مسلح و آسیب دیدگی جزئی پیل در جنوب شهر آداپازاری



شکل (۲۸): نشست قابل توجه یک ساختمان مسکونی بر اثر زلزله در شهر آداپازاری



تصویر (۲۶): نشست قابل توجه یک ساختمان تجاری دو نبش بر اثر زلزله در شهر آداپازاری



شکل (۲۹): نشست زیاد ساختمان بر اثر زلزله در شهر آداپازاری [۱]



شکل (۳۰): نشست زیاد ساختمان بر اثر زلزله که به حذف پارکینگ ساختمان و آسیب دیدگی اساسی وسیله نقلیه منجر شده است، شهر آداپازاری [۱]

است. تصویر (۳۱) نشست محدود یک مسجد در شهر آداپازاری و تصویر (۳۲) نمونه ای از نشست و چرخش محدود ساختمانها در شهر ایزمیت که بر روی خاک رس نرم احداث شده اند را نشان می دهند.



تصویر (۲۷): نشست قابل توجه یک ساختمان مسکونی بر اثر زلزله در شهر آداپازاری

در ساختمانهای با نشست محدودتر در شهر آداپازاری و یا در شهرهای دیگر نظیر ایزمیت، پدیده روانگرایی در پی ساختمانها به وقوع نپیوسته است و این نشست یا چرخش از تغییرشکلهای در حین وقوع زمین لرزه در بالا و پایین سطح آب و نشست خاک بر اثر استهلاک اضافه فشار آب منفذی ناشی از زمین لرزه پس از توقف آن ناشی شده-

۲- تأثیر شرایط ساختگاه در زمین لرزه ایزمیت بر توزیع و نحوه خرابی سازه ها و تأسیسات انکارناپذیر است و اهمیت این بعد از مطالعات را در تحلیل خطر زمین لرزه برای یک ساختگاه نشان می دهد.

۳- پدیده روانگرایی، عمده ترین پدیده ژئوتکنیکی در زمین لرزه ایزمیت، عامل اصلی در ناپایداریهای ژئوتکنیکی نظیر ناپایداری با گسترش جانبی، لغزش روانه زمین، شکست ظرفیت باربری پی ها و نشست و چرخش قابل توجه در آنها بوده است. عامل روانگرایی علی رغم تأثیر مخرب و ایجاد ناپایداریهای ژئوتکنیکی نقش کاهش انرژی ورودی به ساختمانها را نیز در بعضی از نقاط در شهر آداپازاری ایفا نموده است که به تخریب کمتر آنها علی رغم مشکلات طراحی و اجرای آنها، منجر شده است. البته این نقش عمدتاً می تواند در کاهش خسارات جانی تا حدی مؤثر بوده باشد و خسارت مالی وارده و ضرورت تخریب و بازسازی مجدد ساختمانها نشان می دهد که پی سازی مناسب و طراحی و اجرای ساختمانهای مقاوم تر در مقابل زلزله با هدف کاهش خسارات جانی و مالی بهترین راه حل مهندسی است.

۴- پی های سطحی در شهر آداپازاری عملکرد مناسبی را در زلزله ایزمیت، به دلیل سست بودن لایه های سطحی خاک سیلنتی و ماسه ای و بالا بودن سطح آب زیرزمینی، از خود نشان نداده اند و شکست ظرفیت باربری و نشست و چرخش پی ها به طور گسترده در این شهر به وقوع پیوسته است. بهبود شرایط پی و یا استفاده از پی های عمیق تر در چنین شرایط بافت تحت الارضی و انتقال بار به لایه های قویتر خاک قطعاً در کاهش خسارات وارده به ساختمانها می توانست مفید و مؤثر واقع گردد.

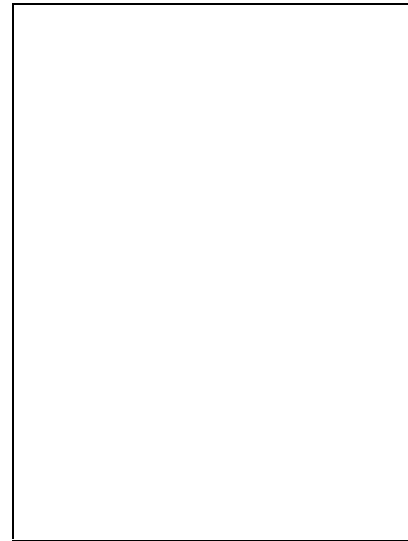
## ۸- مراجع

- ۱- Website دانشگاه Bogazici استانبول ترکیه.
- ۲- بروشور اطلاعاتی در مورد زلزله همراه روزنامه های ترکیه با نام SABAH در اول سپتامبر ۱۹۹۹.

3-Initial Geotechnical Observations of the August 17, 1999, Kocaeli Earthquake, A Report of the Turkey-US Geotechnical Earthquake Engineering Reconnaissance Team, GEES Website, Sep. 3, 1999.



شکل (۳۱): نشست محدود ساختمان مسجد در شهر آداپازاری که علی رغم قطع آب در سرویس بهداشتی آن در حال بهره برداری است



شکل (۳۲): نشست و چرخش محدود ساختمانها در شهر ایزمیت، ساختمان میانی نسبت به ساختمان انتهایی تصویر نشست و چرخش جزئی داشته است

## ۷- جمع بندی

موارد عمده ذیل از ابعاد ناپایداریهای زمین و ملاحظات ژئوتکنیکی زلزله ایزمیت قابل ذکر و حاوی نکات قابل توجه از لحاظ آموزشی برای مهندسين زلزله می باشند:

- ۱- رفتار ساختمانها و مستحداثات مجاور گسلها در زلزله ایزمیت نشان می دهد که در بعضی موارد علی رغم جا به جاییهای بسیار زیاد افقی و یا قائم ساختمانهای مجاور گسلها (و نه بر روی گسلها) خسارات عمده ای متوجه آنها نشده است. این پدیده باید مورد ارزیابی دقیقتر قرار گیرد و دلایل آن در مواردی نظیر سازوکار گسلش، زمین شناسی سطحی ساختگاه و مشخصات حرکت ارتعاشی در مجاور گسلها شناسایی و تعیین گردد.