

## ویژگی های زمین شناسی، ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی گسل توس در شمال شهر مشهد

اصغر آزادی<sup>۱</sup>، غلام جوان دولویی<sup>۲\*</sup>، ناصر حافظی مقدس<sup>۳</sup> و خالد حسامی آذر<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

<sup>۴</sup> استادیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۸۵/۱۰/۲۵، پذیرش نهایی: ۱۳۸۵/۱۱/۸)

### چکیده

گسل توس شاخه ای از گسل کشف رود است که روند شمال غربی - جنوب شرقی دارد. شواهد زمین ریخت شناختی نشان می دهد که ادامه این گسل از شمال غربی شهر مشهد در نزدیکی های توس وارد محدوده شهری می شود. این گسل با عبور از کنار بقعه خواجه ربیع به سمت شمال شرقی شهر مشهد امتداد می یابد و از حاشیه شهرک گلشهر خارج می شود. با توجه به انبوه جمعیت ساکن و زائران مستقر در شهر مشهد و اجرای پروژه های عظیم صنعتی - اقتصادی (برای نمونه، پروژه الماس شرق، متروی مشهد و مانند آن) بررسی گسل توس اهمیت خاصی دارد. هدف از تحقیق حاضر بررسی دقیق تر هندسه و مسیر گسل توس در شهر مشهد است. در این راستا داده های موجود شامل بررسی های زمین شناسی، ژئوتکنیک و خرد لرزه سنجی مورد بررسی قرار گرفته و بر این مبنا محل های مناسب برای بررسی های مقاومت سنجی (ژئوالکتریک) تعیین شده است. نتایج به دست آمده در این مقاله نشانگر آن است که گسل توس با پهنه ای به عرض ۲-۳ کیلومتر، دارای سازوکار معکوس با شیبی به سمت جنوب غرب است که فعالیت آن در طی دوره کوتاه ترنر کاملاً مشهود است.

واژه های کلیدی: زمین شناسی، ژئودزی، ژئوفیزیک، گسل توس

## Geological, geotechnical and geophysical characteristics of the Tus Fault located North of Mashhad, North-eastern Iran

Azadi, A.<sup>1</sup>, Javan-Doloei, Gh.<sup>2</sup>, Hafezi-Moghadas, N.<sup>3</sup> and Hessami-Azar, K.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph. D. Student of Geophysics, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Earth Science, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>4</sup>Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

(Received: 15 Jan 2008, Accepted: 24 Jan 2009)

### Abstract

The NW-SE trending Tus fault is one of the active faults in the north-east of Iran. Geomorphologic evidences indicate that this fault is active and goes through Mashhad city from near Tus town. Since the population and number of pilgrims in this city are high, the study of the Tus fault is of great importance. Hence, we have carried out a new investigation to evaluate the hazardous potential of this fault. This study includes analysis of geomorphologic evidence (such as offset streams recognized in aerial photos and geological maps), geophysical, geodesy and geotechnical surveys.

The Copeh Dagh area includes active fold mountains in the north-east of Iran in contact

with the aseismic cratons of Eurasia . The NW-SE trending Tus fault is one of the active faults in Copeh Dagh in the north-east of Iran near Mashhad , the capital of Razavi Khorasan province. Studies of aerial photos detected tracing of this fault on alluvial deposits. Hafezi Moghaddas et al. (2007) showed that the change of path streams in the valleys of Mashhad is correlated with the Tus fault trend. This fault enters into Mashhad from the north- west near the town of Tus and passes through Khajeh-rabee and then exits from Golshahr complex in the eastern part of Mashhad.

Occurrences of some earthquakes north of Mashhad may be related to this fault. Since Mashhad is a heavily populated city and there are old buildings in the city, the investigation of the characteristic of the fault is very important. From 1982 to 1983 an electrical resistivity study was done by the water organization of Khorasan province in order to determine the water level in mashhad area. These data were again reprocessed for tracing the fault and some cross sections were prepared again and interpreted. A land subsidence study was carried out in Mashhad during 1995 to 2005 (Motagh et al., 2007). In this study the three methods of InSAR, leveling and GPS measurements were used. The results indicated that the valley floor with a north-western-south-eastern trend subsided at a rate of  $15 \text{ cm yr}^{-1}$  during 2003 to 2005. In this paper we have considered an assessment of the geological characteristics and historical earthquake seismicity of the area. These investigations show that some of the powerful, historic earthquakes in Iran took place in Khorasan province at the north-eastern part of the Iranian plateau, the epicenters of some of which were located in Mashhad city (Ambrasys and Melville, 1982; Berberian et al., 1999).

The seismic exploration technique has been carried out for determining shear wave velocity, through six boreholes along the Tus fault. The results of this study show a composition of typical marls around the first borehole, while geological setting around other boreholes were composed of alluvial material such as sand, silt with traces of gravel and clay. Moreover, our results have shown that the least shear wave velocity is about 500 m/sec along BH#10.

Microtremore studies have been carried out for deriving the background vibration of the earth's surface from artificial sources such as traffic, industrial machinery and so on. In this method usually a three-component seismometer is installed for recording noise during a period of about 20 minutes. Then horizontal to vertical spectral ratio is calculated to extract the predominant period. This type of measurement is repeated for many points around the Tus fault and finally, the iso-predominant period map is prepared for the area of study. For completing the study and defining the fault some general electrical resistivity sounding point and three-dimensional electrical resistivity surveys have been taken and then measurement data are processed and interpreted. For defining the deep geometry of the fault an array of deep electrical soundages has been designed and tested. The results of the deep electrical resistivity test showed that the Tus fault has a reverse mechanism with dip direction to the south-west, towards the populated area of the city.

After revising and correlating these studies, a supplementary study with the electrical resistivity method has been conducted in the area along the Tus fault. Results show that this fault is a reverse fault and has a dip direction to south-west. The activity of this fault during the Quaternary Period is evident from displaced alluvial deposits. These results show it is necessary to prepare a suitable legal order for limiting construction near this fault and it is recommended that the present buildings should be reinforced as well.

**Key words:** Iran , Geodesy, Geology, Geophysics, Mashhad , Tus fault

## ۱ مقدمه

همکاران، ۱۳۸۵). با بررسی مجدد داده‌ها و پیشینه تحقیقات صورت گرفته، به‌ویژه بررسی‌های زمین‌شناسی و لرزه زمین‌ساخت ناحیه مشهد (بربریان و همکاران، ۱۳۷۸) و دیگر بررسی‌های ژئوفیزیکی، موقعیت گسل توس تا حدودی مشخص شد. در بخش دوم این پژوهش برای تکمیل تحقیقات، عملیات ژئوالکتریک تکمیلی صورت گرفت. تلفیق نتایج به‌دست آمده از برداشت‌های تکمیلی با نتایج سایر روش‌ها، وضعیت گسل توس را در پهنه‌ای به عرض ۲-۳ کیلومتر به‌خوبی مشخص کرده است.

## ۲ ویژگی‌های زمین‌شناسی گستره مشهد

پهنه رسوبی- ساختاری کپه‌داغ شامل کوه‌های هزار مسجد در شمال شرق ایران است که در راستای غرب شمال‌غرب تا شرق جنوب شرق، از شرق دریای خزر آغاز و با امتداد در راستای مرز مشترک ترکمنستان و ایران، وارد خاک افغانستان می‌شود (آفانباتی، ۱۳۸۳). پهنه کپه‌داغ به‌طور کلی شامل سه بخش پیش‌گودال کپه‌داغ، کوه‌های چین‌خورده-رانده شده و فرونشست مشهد- قوچان است (بربریان و همکاران ۱۳۷۸). پیش‌گودال کپه‌داغ، بخش فروافتاده کوه‌های چین‌خورده-رانده شده کپه‌داغ است که پی‌سنگ آن با رسوب‌های قاره‌ای مولاسی نئوژن و کواترنر پوشیده شده است. کوه‌های چین‌خورده-رانده شده کپه‌داغ از رسوب‌های شیلی، آهکی، مارنی و ماسه‌سنگ ژوراسیک تا الیگوسن تشکیل شده است. این رسوب‌های دارای ضخامت حدود ۸۰۰ متر است که روی آنها را سنگ‌های آواری سرخ‌رنگ قاره‌ای میوسن و پلیوسن پوشانده است. مرز جنوب غربی کوه‌های پهنه کپه‌داغ با فرونشست مشهد-قوچان را گسل کشف‌رود تشکیل می‌دهد (بربریان و

گسل توس شاخه‌ای از گسل کشف‌رود است که دارای روند شمال غربی- جنوب شرقی است. اثر این گسل روی عکس‌های هوایی نشان‌دهنده آن است که ادامه این گسل احتمالاً از شمال غرب مشهد در حاشیه توس وارد محدوده شهر مشهد شده است و از کنار بقعه خواجه ربیع عبور می‌کند و از شمال شرقی شهر مشهد، در حوالی شهرک گلشهر خارج می‌شود. وقوع چندین زلزله تاریخی در شمال شهر مشهد را می‌توان در ارتباط با گسل توس دانست (امبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲). با توجه به اینکه مشهد مقدس، یکی از کلان‌شهرهای ایران، علاوه بر ازدیاد تراکم جمعیت ساکن و زائرین چندمیلیونی، با بافت فرسوده ابنیه‌های مسکونی روبه‌رو است، اهمیت شناسایی گسل‌های فعال در این شهر محرز و اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله سعی شده است در ابتدا به بررسی پیشینه تحقیقات متعددی که در گذشته در دشت مشهد صورت گرفته است، پرداخته شود. با نظارت سازمان آب منطقه‌ای خراسان طی سال‌های ۱۳۶۲ و ۱۳۶۳ حدود ۴۰۰ سونداژ الکتریک در دشت مشهد به منظور بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی برداشت شده است (سازمان آب منطقه‌ای خراسان، ۱۳۶۳). در این مقاله مقاطع به‌دست آمده از تحقیقات فوق از نظر وجود گسل مورد تحلیل و بررسی مجدد قرار گرفته است. از دیگر بررسی‌های صورت گرفته در ناحیه مشهد، برداشت داده به روش موقعیت‌یابی جهانی (GPS) در سال ۱۳۸۴، ترازیبی و بررسی تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵ از سوی سازمان نقشه‌برداری کشور است (متق و همکاران، ۲۰۰۷). علاوه بر آن، بررسی‌های ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر مشهد از سوی سازمان زمین‌شناسی مشهد طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۵ صورت گرفته است (حافظی مقدس و

همکاران، ۱۳۷۸).

پهنه‌ای افیولیتی به صورت برون‌زدهایی از سنگ‌های اولترابازیک، رادیولاریت و اسلیت در جنوب مشهد گسترش دارد که نشان‌دهنده فرورانش اقیانوس پارینه تئیس به سمت شمال است (بربریان و کینگ، ۱۹۸۱). این پهنه با گسل‌های جنوب مشهد و چناران در شمال از فرونشست مشهد جدا می‌شود. کوه‌های چین‌خورده - رانده شده بینالود در جنوب پهنه افیولیتی و در زون ایران مرکزی قرار می‌گیرد. این پهنه در جنوب غربی با گسل بینالود محدود شده است.

حضور توریدیت‌های دانه‌ریز، رادیولاریت، چرت، روانه‌های بالشی و سنگ‌های اولترامافیک شرق روستای سفیدسنگ واقع در جنوب شرقی مشهد، به سن پرمین پسین و گاهی پرمین میانی، نشان می‌دهد که در اواخر کربنیفر و اوایل پرمین، دربخش شمال شرقی ایران، یک کافت درون‌قاره‌ای به وجود آمده است که از آن زمان به بعد، کپه‌داغ به‌منزله یک حوضه رسوبی مستقل، شرایط رسوبی و زمین‌ساختی ناهمسانی با ایران مرکزی و البرز شرقی داشته است (آقاباتی، ۱۳۸۳).

برش عرضی ساده شده از ناهمواری‌ها و واحدهای زمین‌شناسی در امتداد نیم‌رخ از کوه‌های بینالود تا کوه‌های هزارمسجد در شکل ۱ نشان داده شده است که موقعیت گسل‌های کشف‌رود و توس با رنگ سرخ روی آن مشخص شده است.

### ۳ لرزه زمین‌ساخت گستره پیرامون مشهد

منطقه مشهد در ناحیه بین کوه‌های چین‌خورده - رانده شده کپه‌داغ از سمت شمال شرق و کوه‌های چین‌خورده - رانده شده بینالود از سمت جنوب غرب قرار گرفته است.

دشت وسیع مشهد-قوچان در محل برخورد دو ایالت فوق شکل گرفته است. بررسی زمین‌لرزه‌های منطقه حاکی از فعالیت شدید در قرن‌های گذشته، به‌خصوص در قرن هجدهم میلادی و برقراری آرامش نسبی بعد از آن است (بربریان و قرشی، ۱۳۶۸). وجود گسل‌های توانمند و فعال در دو طرف دشت و در فاصله اندک از شهر نشان‌دهنده پتانسیل زیاد خطر زمین‌لرزه در این منطقه است.

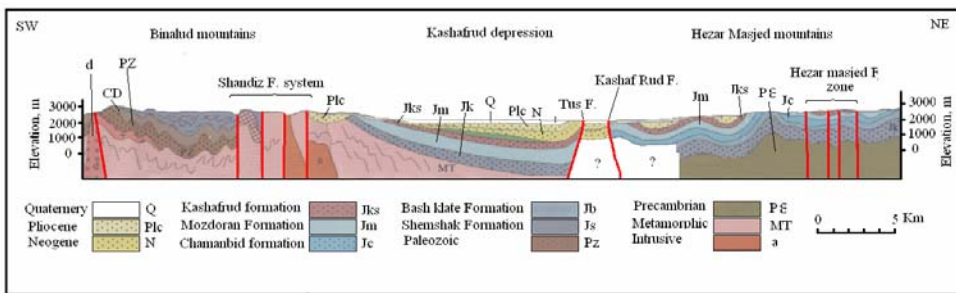
### ۱-۳ گسل‌های مهم گستره پیرامون مشهد

از آنجا که حرکت زمین در دو طرف سطح گسل در بسیاری موارد با زمین‌لرزه همراه است، بررسی گسل‌های فعال می‌تواند پایه‌ای برای بررسی‌های لرزه زمین‌ساختی باشد. براساس بربریان و همکاران (۱۳۶۴) گسل‌هایی که حداقل دارای یکی از ویژگی‌های اصلی و شش‌گانه زیر باشند، درحکم گسل فعال یا گسل دارای توان جنبایی در نظر گرفته می‌شوند.

الف) رخداد زمین‌لرزه‌های تاریخی در بخشی از امتداد گسل؛ ب) مکان‌یابی زمین‌لرزه‌های بزرگ با خطای کم در نقطه‌ای از امتداد گسل‌های امتدادلغز و یا فرادیواره گسل‌های فشاری و یا کششی؛ ج) گسلش در رسوبات کواترنر پسین؛ یک جنبش در ۳۵۰۰۰ سال و یا دو جنبش یا بیشتر در ۵۰۰۰۰۰ سال گذشته (کمیسیون تاسیسات هسته ای امریکا، ۱۹۷۳)؛ د) دیواره گسل‌های فعال در روی زمین که با فرسایش از میان نرفته باشند؛ ه) رویداد خردزمین‌لرزه زیاد همبسته با سطح گسل که از سوی شبکه لرزه‌نگاری محلی با خطای کم در کانون روی زمین و کانون ژرفی برداشت می‌شوند؛ و) همبستگی زمین‌ساختی یک گسل با گسل شناخته‌شده فعال که به‌سبب جنبش گسل فعال، جنبشی در گسل مجاور روی دهد.

باشند و در پیوند با ساختارهای اصلی نیز قابل تفسیر نباشند، گسل های به احتمال ناجنبا (غیرفعال) گفته می شود (تریفونف و ماچتی، ۱۹۹۳). حسامی آذر (۱۳۸۵) گسل های ناحیه مشهد را براساس تعریف (تریفونف و ماچتی، ۱۹۹۳) به دو دسته گسل های جنبا و با توان جنبایی مطابق جدول ۱ تقسیم بندی کرده است. مهم ترین گسل های فعال در این تقسیم بندی، گسل های توس، کشف رود، شاندیز، شمال نیشابور، خیرآباد و بالهر هستند که با توجه به موضوع مقاله، گسل توس با جزئیات بیشتر مورد بحث قرار می گیرد.

تریفونف و ماچتی (۱۹۹۳) گسل های دارای آخرین نشان جنبایی در هولوسن را به منزله گسل جنبا و در پلیستوسن درحکم گسل های دارای توان جنبایی در نظر گرفته اند. بنا بر این تعریف، گسل های دارای توان جنبایی، قادر به ایجاد جابه جایی های عهد حاضر هستند، اما احتمال فعالیت آنها در زمان حاضر کمتر از گسل های جنبا است. گسل هایی که از نظر ساختاری و زمین شناسی اهمیت داشته اند اما نشانی از جنبایی یا گواهی بر رد جنبایی آنها وجود ندارد را در رده گسل های دارای فعالیت نامشخص دسته بندی می کنند. به مجموعه ای از گسل ها که اهمیت ساختاری ویژه ای نداشته



شکل ۱. برش عرضی ساده شده از ناهمواری ها و واحدهای زمین شناسی گستره مورد بررسی از کوه های بینالود تا کوه های هزارمسجد (برگرفته از برش عرضی KK، شرکت ملی نفت ایران، با تغییر مختصر). موقعیت گسل های کشف رود و توس با خط سرخ نشان داده شده است.

جدول ۱. گسل های جنبا و با توان جنبایی در گستره شعاع ۱۰۰ کیلومتری پیرامون مشهد (حسامی آذر، ۱۳۸۵).

طول (km)	گسل های جنبا
۷۷	سیستم شاندیز
۱۰۰	توس
۱۲۰	کشف رود
۵۱	خیر آباد
۹۵	بینالود
۵۰	شمال نیشابور
۵۲	نیشابور
۱۳۶	بالهر

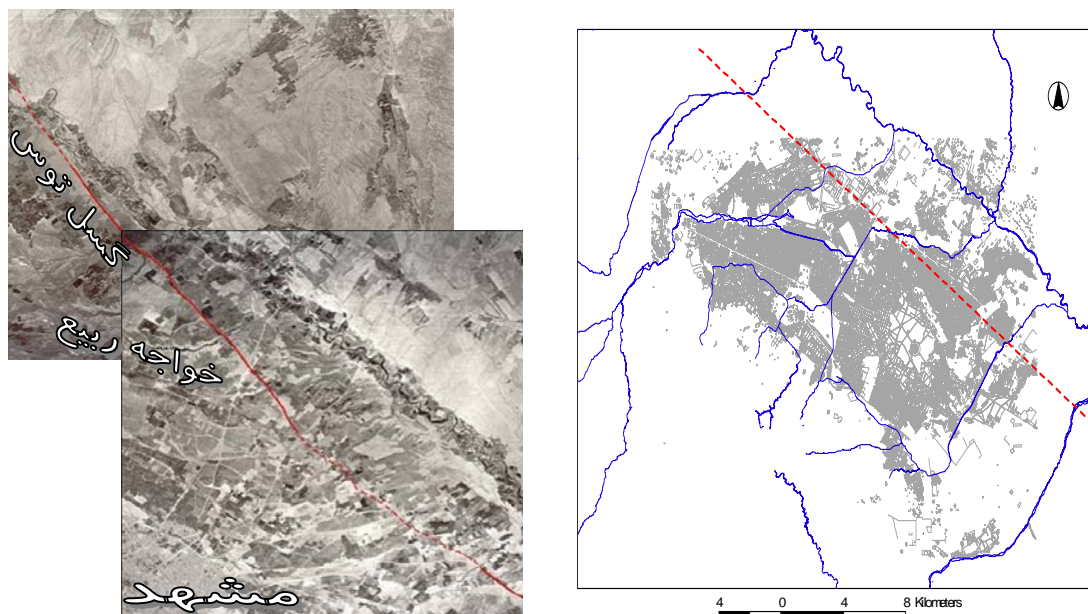
طول (km)	گسل های با توان جنبایی
۷۰	مزدوران
۵۲	سرخ ده
۱۵۰	گوچکی
۵۷	تبادکان
۱۵۱	امروداک
۴۱	آغار
۱۱۰	الله اکبر
۸۰	فریمان

## ۳-۲ گسل توس

با بررسی عکس‌های هوایی ۱:۵۵۰۰۰، روند گسل توس در شمال و شمال شرقی شهر مشهد قابل مشاهده است (شکل ۲). طول گسل توس با توجه به عکس هوایی و نقشه زمین‌شناسی و مشاهدات صحرایی حدود ۱۰۰ کیلومتر برآورد شده است. این گسل در محدوده‌هایی نظیر خواجه ربیع باعث بالا آمدن زمین شده است و در بخش‌های دیگر با آبرفت جدید پوشیده شده است. آبراهه‌هایی که از کوهپایه‌های جنوب و جنوب غرب مشهد سرچشمه می‌گیرند، بعد از رسیدن به روند خطی پیش‌گفته به سمت شرق منحرف شده‌اند (شکل ۲، راست)، گسل توس با راستای شمال غربی جنوب شرقی مرز میان دشت توس و تپه‌های شمالی آن (آهک‌های آلگ‌دار خاکستری سازند مزدوران) را در شمال شهر توس

تشکیل می‌دهد. ادامه این گسل در بخش جنوب شرقی در رسوب‌های آبرفتی کواترنری خیلی واضح نیست. در نزدیکی خواجه ربیع یک افراز (پرتگاه) گسلی (fault scarp) در امتداد آن مطابق شکل‌های ۳ الی ۵ مشاهده شده است، به طوری که تپه‌های مارنی در کنار رسوب‌های دشت سیلابی قرار گرفته است.

در شکل ۶ موقعیت مکانی زمین‌لرزه‌های مهم همراه با راستای بردارهای فشاری و کششی و صفحه‌های گسلی آنها بر پایه اطلاعات موجود در دانشگاه هاروارد ارائه شده است. با بررسی موقعیت کانونی و سازوکارهای ژرفی زمین‌لرزه‌ها به احتمال زیاد زمین‌لرزه ۱۹۸۵/۸/۱۶ در ارتباط با فعالیت گسل توس است که گسلی رانده، دارای شییبی به سمت جنوب غربی است.



شکل ۲. چپ: مسیر گسل توس در عکس هوایی ۱:۵۵۰۰۰ شماره ۲۱۲۷ و ۱۶۲۷. راست: مسیر آبراهه‌های اصلی مشهد (خطوط آبی رنگ) که از ارتفاعات جنوب و جنوب غرب مشهد سرچشمه گرفته‌اند و پس از رسیدن به مسیر گسل توس (خط چین سرخ رنگ) به سمت راست منحرف شده‌اند.



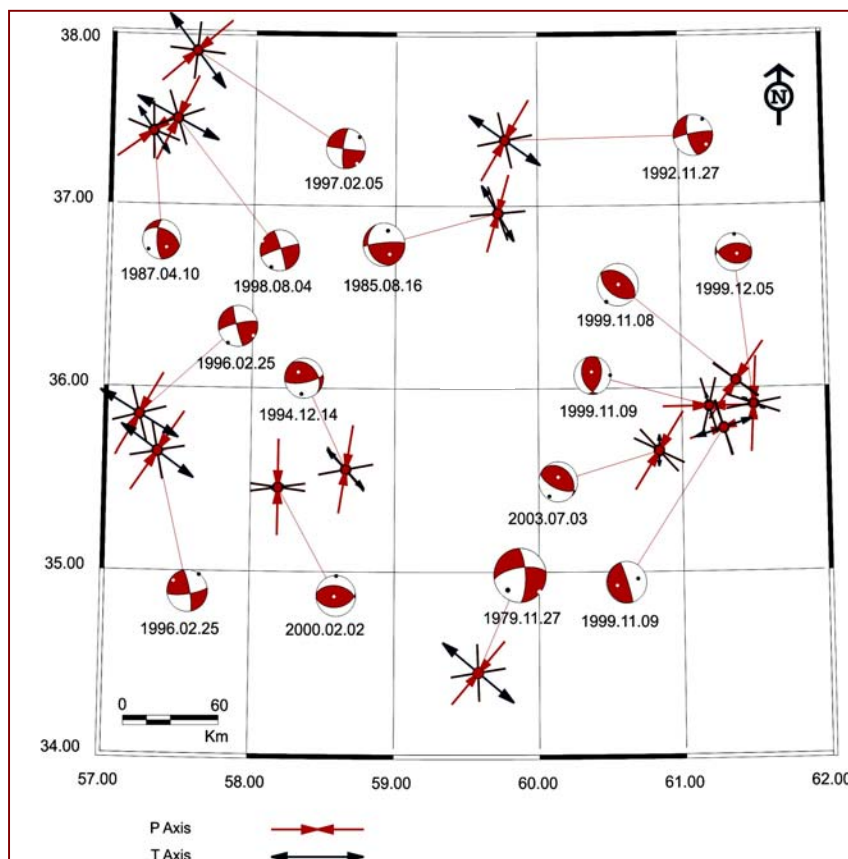
شکل ۳. گسل توس در شمال شهر توس (دید به سمت شمال شرق)، (حسامی آذر، ۱۳۸۵).



شکل ۴. گسل توس در شمال مشهد، شرق خواجه ربیع (نگاه به سمت جنوب غربی).



شکل ۵. گسل توس در شمال مشهد، میدان رسالت (نگاه به سمت جنوب غربی).



شکل ۶. سازوکار زمین‌لرزه‌های مهم پیرامون مشهد بر پایه اطلاعات موجود در دانشگاه هاروارد. در این شکل موقعیت مکانی این زمین‌لرزه‌ها همراه با وضعیت بردارهای فشاری و کششی و صفحات گسلی به دست آمده به نمایش درآمده‌اند (حسامی آذر، ۱۳۸۵).

نیشابور، چهار زمین‌لرزه تاریخی ۱۵۹۸ میلادی، ۱۶۷۳/۸/۳۰ میلادی، ۱۶۸۷/۴/۰۰ میلادی و ۱۸۸۳/۱۲/۲۶ میلادی که در حوالی مشهد رخ داده‌اند را در حاشیه مسیر گسل توس قرارداده‌اند. درحالی‌که در متن گزارش با توجه به بررسی اسناد تاریخی و خرابی‌های ایجاد شده در مشهد و احساس شدن آن در نیشابور نتیجه گرفته‌اند که مسبب دو زمین‌لرزه تاریخی ۱۶۷۳/۸/۳۰ میلادی و ۱۸۸۳/۱۲/۲۶ میلادی گسل کشف‌رود یا گسل شاندیز بوده است. با توجه به اینکه ادامه گسل کشف‌رود هنگام عبور از محله توس مشهد به نام گسل

#### ۴ بررسی زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی گستره

##### مشهد

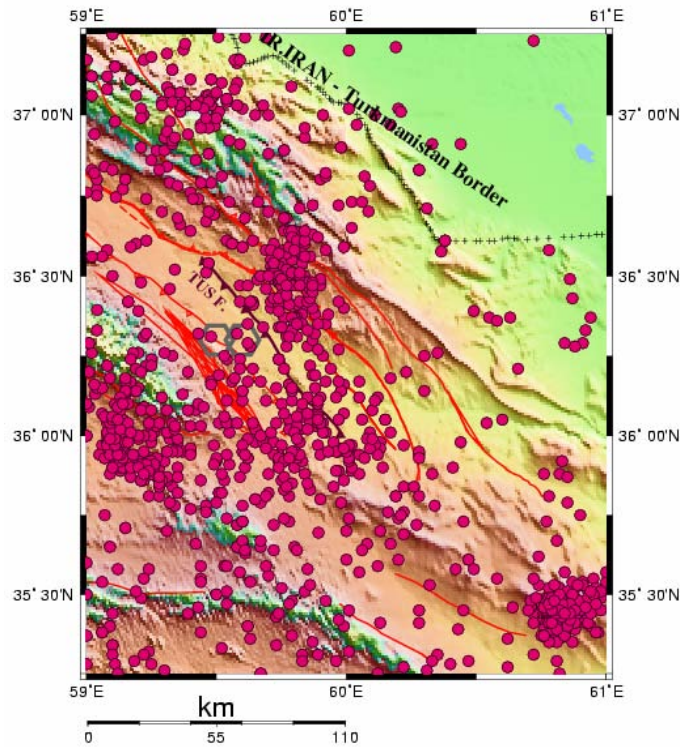
بررسی زمین‌لرزه‌های تاریخی ناحیه خراسان نشان می‌دهد که تعداد زیادی زمین‌لرزه تاریخی در پهنه خراسان گزارش شده است که برخی از آنها در محدوده شهر مشهد به وقوع پیوسته‌اند و ممکن است مرتبط با فعالیت گسل توس باشند (امبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲؛ بربریان و همکاران، ۱۳۷۸).

شایان ذکر است که بربریان و همکاران (۱۳۷۸) در برگه (۴-۱) نقشه لرزه‌خیزی تاریخی و گسل‌های منطقه مشهد-



شده‌اند که موقعیت آنها در امتداد گسل توس گزارش شده است، استدلال فعالیت گسل توس را منطقی‌تر می‌دانیم. لرزه‌خیزی شکل ۷ که براساس فهرست‌نامه زمین‌لرزه‌های ایران (میرزایی و همکاران، ۱۳۸۱) و سایت موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ترسیم شده است، بیانگر آن است که موقعیت تعداد زیادی از زمین‌لرزه‌های دستگاهی از روند گسل توس تبعیت می‌کنند و این موضوعی است که فعالیت گسل توس را مورد تایید قرار می‌دهد.

توس معرفی شده است و به شهر مشهد نزدیک‌تر است و با عبور آن از مناطق مسکونی شمال شرق مشهد، تعیین وضعیت آن با استفاده از شواهد زمین‌شناسی در آن زمان امکان‌پذیر نشده بود. ما با تکیه بر نقشه لرزه‌خیزی ارائه شده در شکل ۷ که با توجه به قرارگیری موقعیت دو زمین‌لرزه تاریخی فوق که ملویل (۱۹۷۸) و کندرسکایا و شبالین (۱۹۷۷) در نزدیکی گسل توس تعیین مکان کرده‌اند، علاوه بر وقوع تعداد زیادی زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگ دستگاهی که اخیراً در شبکه‌های لرزه‌نگاری مشهد، قوچان و بیرجند ثبت



**شکل ۷.** توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی مشهد و اطراف آن. خطوط سرخ گسل‌های منطقه را نشان می‌دهند. گسل توس با رنگ قهوه‌ای تیره و سازوکار معکوس با شیب به سمت جنوب غرب نشان داده شده است. دو زمین‌لرزه تاریخی مشهد که ملویل (۱۹۷۸) و کندرسکایا و شبالین (۱۹۷۷) روی فرا دیواره گسل توس تعیین محل کرده‌اند با نماد شش ضلعی خاکستری رنگ مشخص شده‌اند. دایره‌های صورتی رنگ موقعیت زمین‌لرزه‌های دستگاهی از ابتدای قرن بیستم تاکنون براساس فهرست‌نامه زمین‌لرزه‌های ایران (میرزایی و همکاران، ۱۳۸۱)، سایت موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (<http://irsc.ut.ac.ir/>) و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (<http://www.iiess.ac.ir/>) را نشان می‌دهند.

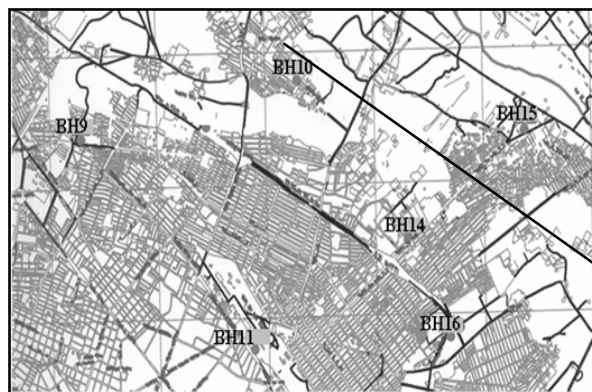
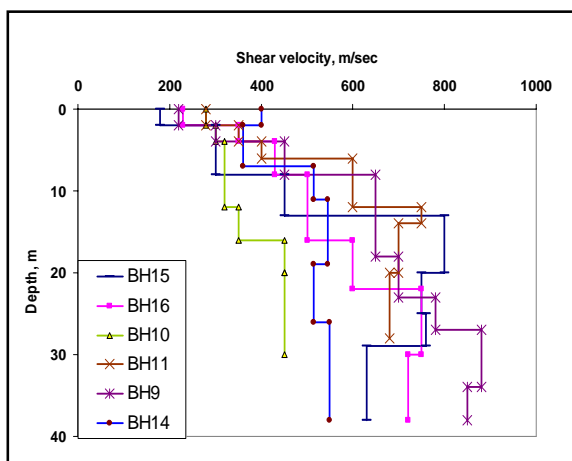
## ۵ ویژگی‌های ژئوتکنیکی گستره مورد تحقیق

### ۱-۵ بررسی امواج برشی

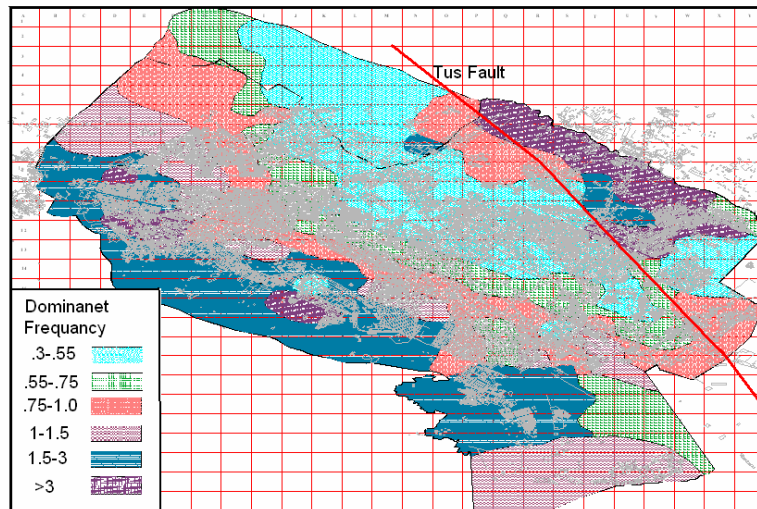
جهت ارزیابی موقعیت دقیق گسل توس در شمال مشهد در قالب پروژه ریز پهنه‌بندی شهر مشهد تعداد شش گمانه به موازات خط اثر گسل حفاری شده است. در این گمانه‌ها علاوه بر برداشت نیم‌رخ خاک آزمایش‌های لرزه‌نگاری امواج برشی به روش سطح به عمق (down-hole) نیز صورت گرفته است که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. جنس زمین در گمانه شماره BH10 در منطقه خواجه ربیع از سطح زمین تا عمق ۲۵ متر مارن با سرعت امواج برشی کمتر از ۵۰۰ متر بر ثانیه است. در حالی که گمانه‌های BH9، BH11، BH15 و BH16 شامل تناوبی از شن، ماسه و تا اندازه‌ای سیلت و رس مربوط به رسوب‌های آبرفتی دشت سیلابی با سرعت امواج برشی متغیر بیشتر از ۵۰۰ متر بر ثانیه هستند. در گمانه BH14 در عمق مجدداً به سنگ کف مارنی برخورد شده است.

### ۲-۵ تحقیقات مایکروترمور در گستره شهر مشهد

تحقیقات مایکروترمور در شهر مشهد با هدف تعیین نقشه پریود غالب خاک در شبکه‌های یک کیلومتر مربعی صورت گرفته است (حافظی مقدس و قائم مقامیان، ۱۳۸۴). بررسی نتایج فوق حاکی از کاهش ناگهانی پریود غالب خاک در نزدیک به گسل توس است (شکل ۹). این امر نشان دهنده بالاتر بودن سنگ کف در حاشیه گسل توس در شمال شهر مشهد است. در حالی که با توجه به وضعیت توپوگرافی و رسوب‌گذاری متأثر از آن انتظار می‌رود که از جنوب به سمت شمال و نیز از غرب به سمت شرق بافت خاک ریزدانه‌تر و پریود تشدید افزایش یابد و مشاهده خاک سخت با پریود پایین در منطقه خواجه ربیع خلاف روند عادی فوق است. بنابراین به نظر می‌رسد که ناهمگنی خاک‌ها در محدوده فوق در اثر عملکرد یک گسل ایجاد شده است.



شکل ۸. نقشه موقعیت گمانه‌های حفر شده پیرامون گسل توس (حافظی مقدس و قائم مقامیان، ۱۳۸۴)؛ چپ- نمودار سرعت انتشار امواج برشی برحسب عمق در محل گمانه‌ها.



شکل ۹. نقشه زون‌بندی پریرود طبیعی شهر مشهد (حافظی و قائم مقامیان، ۱۳۸۴).

ایستگاهی نزدیک به ایستگاه توس به مدت یک‌سال (۱۳۸۴) به انجام رسانده است و مقدار فرونشست را ۲۲ سانتی‌متر در سال، مطابق شکل ۱۰-ب تعیین کرده است (متق و همکاران، ۲۰۰۷).

نتایج تداخل‌سنجی تصاویر ماهواره‌ای، مقدار متوسط فرونشست در دشت مشهد را ۲۸ تا ۳۰ سانتی‌متر در سال (برای اندازه‌گیری از راه دور ماهواره‌ای در طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۵) نشان می‌دهند (متق و همکاران، ۲۰۰۷). این مقدار فرونشست بیشتر در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی به‌وجود آمده است و درصد کمتری در اثر نشست تکتونیکی رخ داده است. در اثر افت سطح آب زیرزمینی چگالی خاک تغییر می‌کند و در خاک حالت بارگذاری به‌وجود می‌آید، در نتیجه خاک با توجه به پارامترهای تحکیم، نشست می‌کند. مقدار فرونشست در اثر افت سطح آب زیرزمینی و یا در اثر پدیده‌های تکتونیکی دقیقاً مشخص نیست، ولی با توجه به وضعیت دشت مشهد و سطح آب‌های زیرزمینی می‌توان گفت که دشت مشهد به‌طور نسبی در حال

## ۶ بررسی فرونشست دشت مشهد براساس داده‌های تداخل‌سنجی تصاویر ماهواره‌ای، ترازیبی و موقعیت‌یابی جهانی

با استفاده از نقشه‌برداری به روش ترازیبی (leveling) در امتداد بزرگراه مشهد- قوچان به طول تقریبی ۵۳ کیلومتر مقدار فرونشست توسط سازمان نقشه‌برداری ایران در طی دو دوره (۱۳۷۵ تا ۱۳۸۰) و (۱۳۸۰ تا ۱۳۸۴) مطابق شکل ۱۰-الف ارائه شده است. در این شکل ایستگاه ۳۸، ایستگاه مبنا است و مقدار فرونشست همه ایستگاه‌ها نسبت به این ایستگاه مبنا به‌طور نسبی تعیین کرده است. در برداشت‌های ترازیبی دوره اول (۱۳۷۵ تا ۱۳۸۰) حداکثر مقدار نشست برای ایستگاه توس (BM50) محاسبه شده است. در حالی که در ترازیبی دوره دوم (۱۳۸۰ تا ۱۳۸۴) حداکثر مقدار نشست مربوط به ایستگاه BM54 واقع در شمال غرب مشهد و به فاصله تقریبی ۱۰ کیلومتر از ایستگاه توس (BM50) است. علاوه بر بررسی‌های ترازیبی، سازمان نقشه‌برداری کشور، اندازه‌گیری به روش موقعیت‌یابی جهانی (GPS) را در

### ۷ تحقیقات ژئوالکتریک گستره مشهد

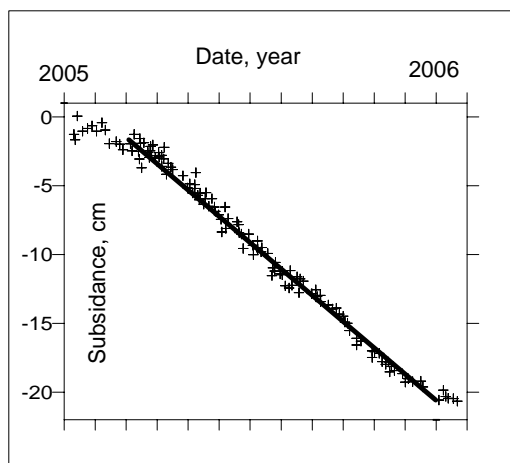
تحقیقات ژئوالکتریک می‌تواند برای مشخص ساختن محدوده گسل کارایی خوبی داشته باشد. تحقیقات ژئوالکتریک دشت مشهد شامل سه مجموعه داده به شرح زیر است:

الف- داده‌های قدیمی سازمان آب منطقه‌ای خراسان، این داده‌ها شامل ۳۷۳ سونداژ الکتریک است که در طی سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۶۳ از سوی سازمان آب منطقه‌ای خراسان برداشت شده است.

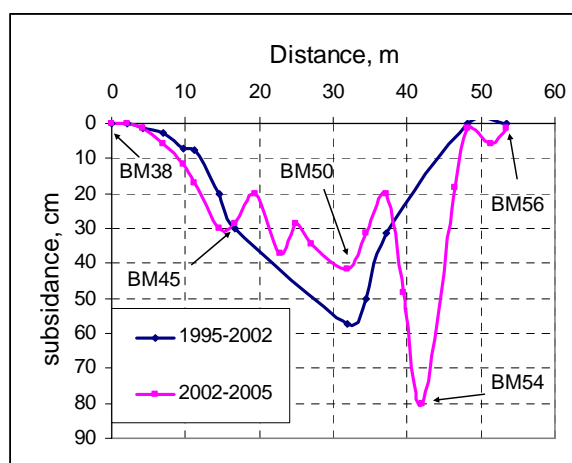
ب- داده‌های ۱۴ سونداژ الکتریک که در سال ۱۳۸۵ در مجاورت خواجه ربیع به صورت پراکنده برداشت شده است؛ هدف از برداشت این سونداژها تعیین وضعیت دو لایه مارنی و رسوبات دشت سیلابی است.

ج- داده‌های برداشت شده با آرایش چهارگوش دوقطبی- دوقطبی که روی افراز گسل توس به منظور تعیین هندسه گسل برداشت شده است.

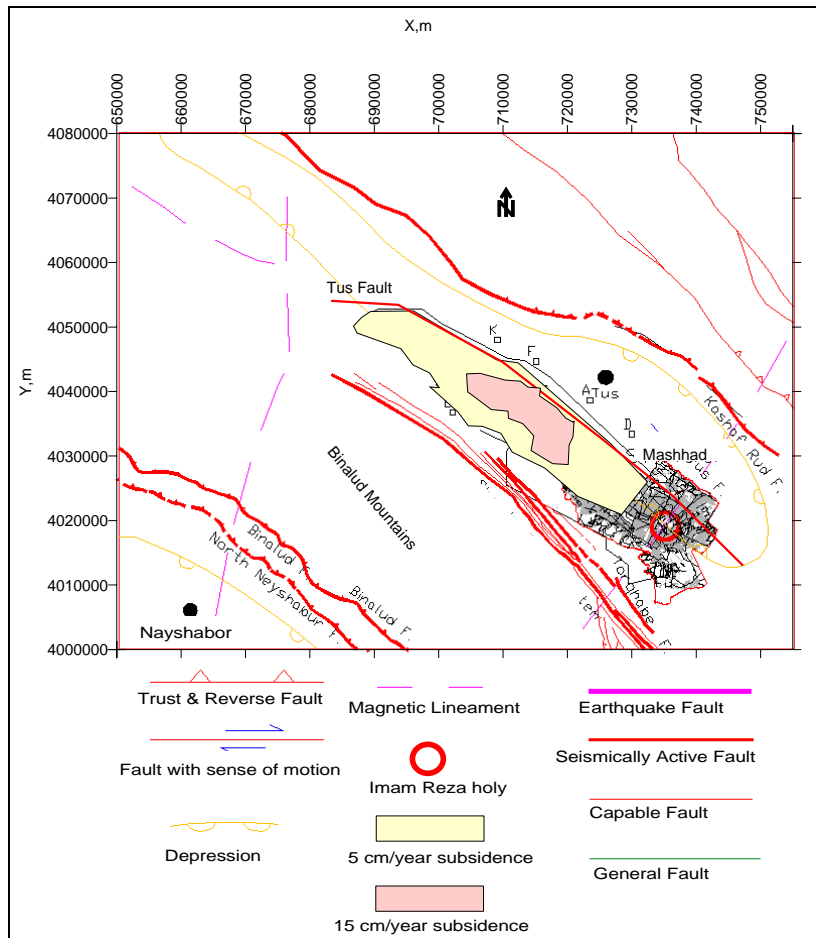
فرونشست تکتونیکی است. در بخش میانی دره‌ها و دشت‌ها، معمولاً مقدار فرونشست نسبت به تغییر سطح آب‌های زیرزمینی باید بیشتر باشد به طوری که در لبه‌های دره‌ها و دشت‌ها حتی الامکان فرونشست وجود نداشته باشد و شاید هم مقداری بالا آمدگی مشاهده شود. با عنایت به شواهد زمین‌شناسی و نتایج اندازه‌گیری‌های متنوع فوق در گستره مشهد، افت ناگهانی مقدار فرونشست در محدوده گسل توس کاملاً مشهود است. به طوری که مقدار فرونشست از ارتفاعات جنوبی به طرف مرکز و شمال افزایش می‌یابد، اما با رسیدن به مرز گسل توس علی‌رغم نزدیک شدن به رودخانه کشف‌رود مجدداً مقدار فرونشست کاهش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده بالاتر بودن سنگ کف در حاشیه گسل توس است. منحنی‌های هم فرونشست (subsidence-Iso) به شکل بیضوی کشیده در امتداد شمال غربی - جنوب شرقی است که گسل توس در مرز شمالی این بیضی قرار گرفته است (شکل ۱۱).



شکل ۱۰. ب: مقدار فرونشست در طی سال ۱۳۸۴ در ایستگاه BM50 با روش GPS حدود  $22 \text{ cm yr}^{-1}$  است.



شکل ۱۱. الف- مقدار فرونشست در مقطع به طول ۵۳ کیلومتر به روش ترازبایی (متق و همکاران ۲۰۰۷).



شکل ۱۱. نقشه فرونشست دره مشهد با روش ترازبایی، محدوده هاشور خورده سرخ مقدار فرونشست اندازه گیری شده بین سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ حدود  $15 \text{ cm yr}^{-1}$ ، محدوده زرد مقدار فرونشست اندازه گیری شده حدود  $15 \text{ cm yr}^{-1}$  را نشان می دهد. گسل توس در مرز بالایی فرونشست کنترل کننده مقدار فرونشست است.

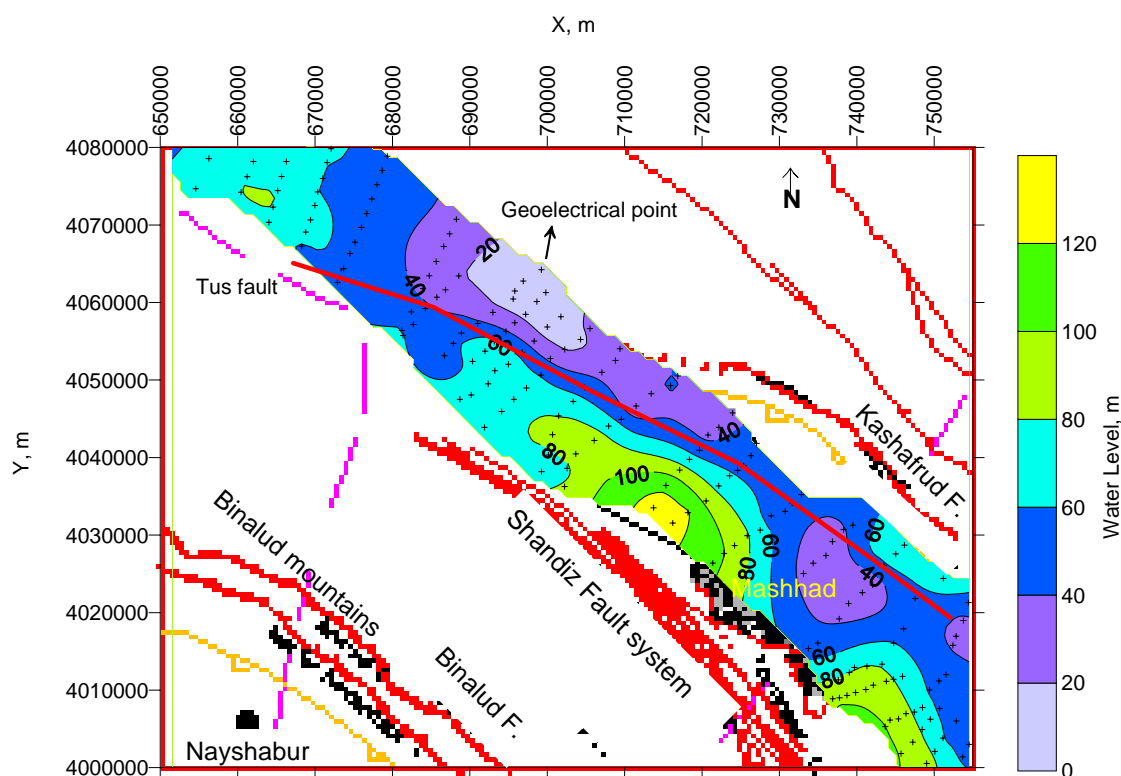
دیدگاه گسل و کنار هم گذاشتن این مقاطع و تفسیر مقاطع دو پارامتر سطح آب زیرزمینی و ضخامت آبرفت به منظور شناسایی محل احتمالی گسل توس مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر آن در شکل ۱۲ منحنی های هم سطح آب زیرزمینی محاسبه و نشان شده است. در این نقشه محدوده ای که کمترین سطح آب زیرزمینی را دارد به منزله محل عبور گسل در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۳ نقشه هم عمق سنگ

۷-۱ تحقیقات ژئوالکتریک گستره مشهد براساس داده های قدیمی در طی سال های ۱۳۶۲ تا ۱۳۶۳ تعداد ۳۷۳ سونداژ ژئوالکتریک از سوی سازمان آب منطقه ای مشهد در دشت مشهد- چناران به منظور شناسایی گستره سفره های زیرزمینی آب برداشت شده است. در شکل ۱۲ موقعیت سونداژها و مقاطع برداشت شده نشان داده شده است. با بررسی مجدد از

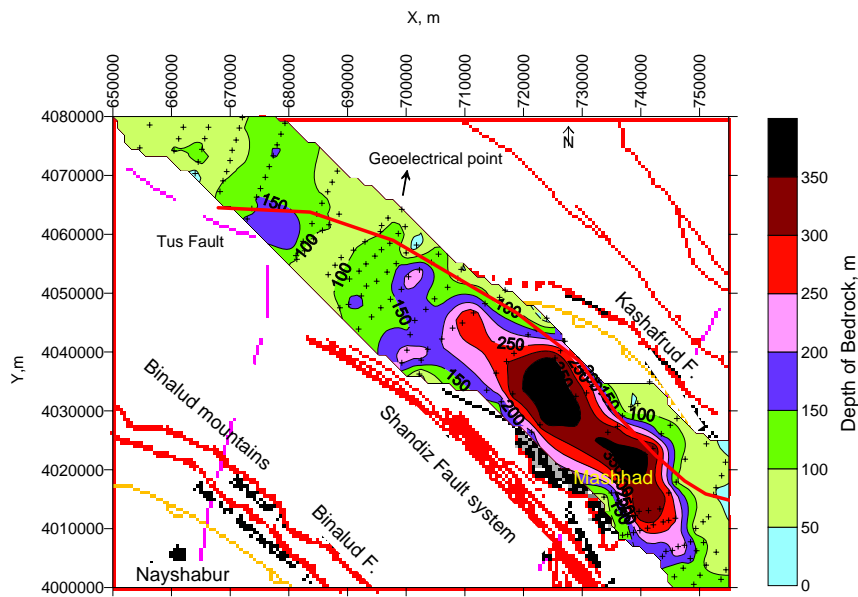
رسوب‌های آبرفتی دشت سیلابی، تعداد ۱۴ سونداژ ژئوالکتریک در محدوده‌ای نزدیک منطقه خواجه ربیع واقع در بخش شمالی مشهد برداشت شد. این محدوده با توجه به فاصله نزدیک مسیر عبور گسل شناسایی شده است که اهمیت زیادی دارد. برای حذف لایه هوازده سطحی، نقشه هم‌مقاومت الکتریکی در عمق ۱۰ متر ( $AB=30\text{m}$ ) تهیه شد. براساس این نقشه دو زون کاملاً متمایز شناسایی شد که یک زون معرف دشت سیلابی با مقاومت الکتریکی ۷۰ تا ۳۵۰ اهم‌متر و دیگری لایه‌های مارنی با مقاومت الکتریکی ۳۰ تا ۵۰ اهم‌متر است. در شکل (۱۴) موقعیت سونداژها و نیم‌رخ‌های ژئوالکتریک و زونهای مارنی و دشت سیلابی نشان داده شده است.

کف آذرینی (نقشه هم‌ضخامت آبرفت) آورده شده است. بیشترین ضخامت در بخش میانی دشت مشاهده می‌شود که کمترین سطح آب زیرزمینی را دارد. بنابراین به‌منزله مسیر عبور گسل در نظر گرفته می‌شود. ضخامت آبرفت از ارتفاعات جنوبی به طرف مرکز و شمال افزایش می‌یابد، اما با رسیدن به مرز گسل توس علی‌رغم دور بودن از ارتفاعات شمالی مقدار ضخامت آبرفت کاهش می‌یابد این کاهش ضخامت را می‌توان به دلیل بالا آمدن نسبی سنگ کف در نزدیکی گسل توس در نظر گرفت.

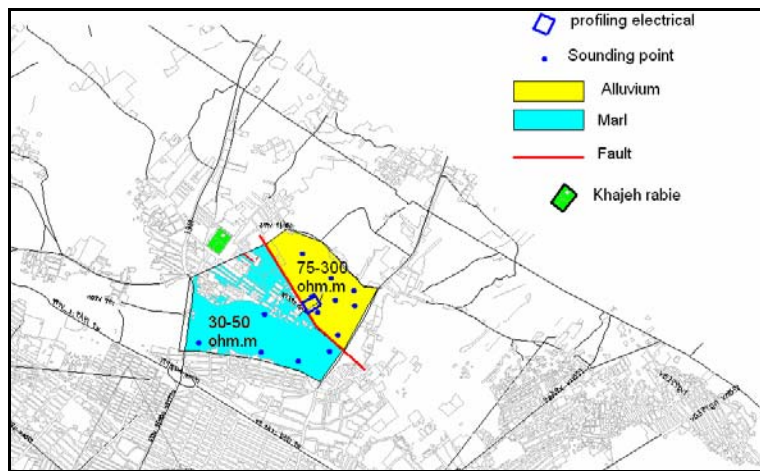
۲-۷ تحقیقات ژئوالکتریک تکمیلی به روش سونداژزنی به‌منظور تعیین مقاومت الکتریکی دو لایه مارنی و



شکل ۱۲. موقعیت سونداژهای الکتریک برداشت شده از سوی سازمان آب منطقه‌ای مشهد و منحنی‌های هم‌سطح آب زیرزمینی و موقعیت گسل براساس تحلیل داده‌ها در پژوهش حاضر.



شکل ۱۳. منحنی هم عمق سنگ کف آذرینی و موقعیت گسل براساس تحلیل و تفسیر مجدد داده ها.

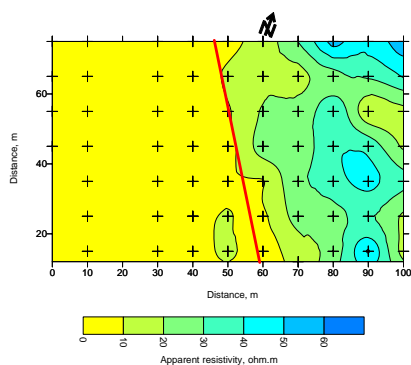


شکل ۱۴. نقشه موقعیت دو زون دشت سیلابی و مارنی با استفاده از تحقیقات ژئوالکتریک تکمیلی به روش سونداژزنی در عمق ۱۰ متر (AB=۳۰m) در شمال شهر مشهد.

گسل ها استفاده کرد. باسی (۲۰۰۰) نشان داد که این آرایش نسبت به روش سونداژزنی و ونر برای شناسایی شکستگی ها و گسل ها، کارایی بهتری دارد. علاوه بر آن، لوکه (۲۰۰۳) به بررسی کاربرد آرایش های گوناگون پرداخته است و برای

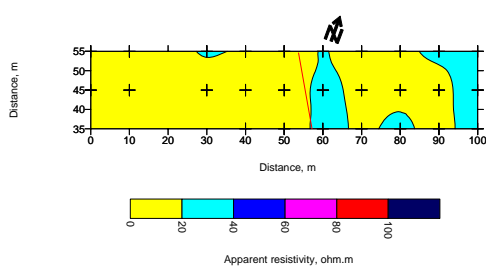
۳-۷ تحقیقات ژئوالکتریک تکمیلی به روش چهار گوش دوقطبی - دوقطبی می توان از آرایش چهار گوش دوقطبی - دوقطبی، درحکم یکی از کارآمدترین آرایش های ژئوالکتریک برای شناسایی

هم مقاومت ویژه ظاهری در شکل های ۱۵- الف تا ۱۵- د آورده شده است. براساس این شکل ها دو زون کاملاً متمایز شناسایی شد که یک زون معرف دشت سیلابی با مقاومت الکتریکی ۷۰ تا ۳۵۰ اهم متر و دیگری لایه های مارنی با مقاومت الکتریکی ۳۰ تا ۵۰ اهم متر و مرز بین این دو زون، گسل توس است. با تحلیل این داده ها و مقایسه آن با نتایج بخش های قبل می توان مقطع ژئوالکتریک گسل را به صورت شکل ۱۶ ارائه کرد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، مقدار جابه جایی حدوداً ۱۵ متر است و گسل شیبی به سمت جنوب غرب دارد.



ب- نقشه هم مقاومت ظاهری ( $AB=30m$ )

عمق حدود ۶ متری

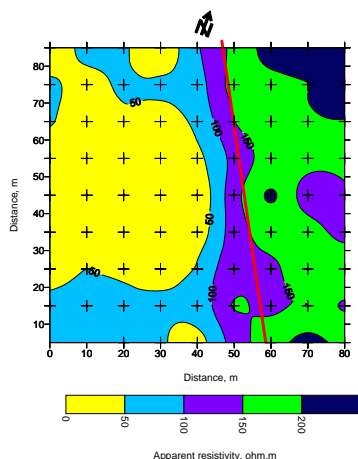


د- نقشه هم مقاومت ظاهری ( $AB=50m$ )

عمق حدود ۱۰ متری

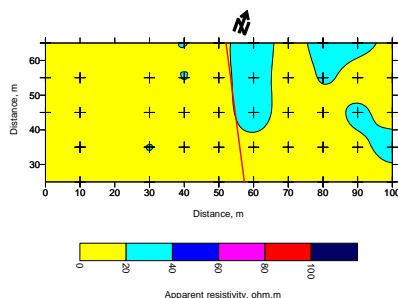
تشخیص گسل، آرایش دو قطبی- دو قطبی را پیشنهاد کرده است. با تعمیم فون ریاضی برای انتخاب متغیرهایی نظیر میرایی و اعمال ضریب ناهمسانگردی موقعیت گسل را در مقطعی با قدرت تفکیک زیاد می توان تهیه کرد (لوکه، ۲۰۰۵).

در این پژوهش برای شناسایی وضعیت هندسه گسل توس، شبکه ای به ابعاد  $80 \times 90$  مترمربع با فواصل ۱۰ متر روی محدوده گسل طراحی شد که برداشت به صورت دوبعدی قطبی- قطبی چهار گوش صورت گرفت. نتایج به دست آمده از این آزمایش پس از پردازش و تحلیل، به صورت نقشه های



الف- نقشه هم مقاومت ظاهری ( $AB=10m$ )

عمق حدود ۲٫۵ متری

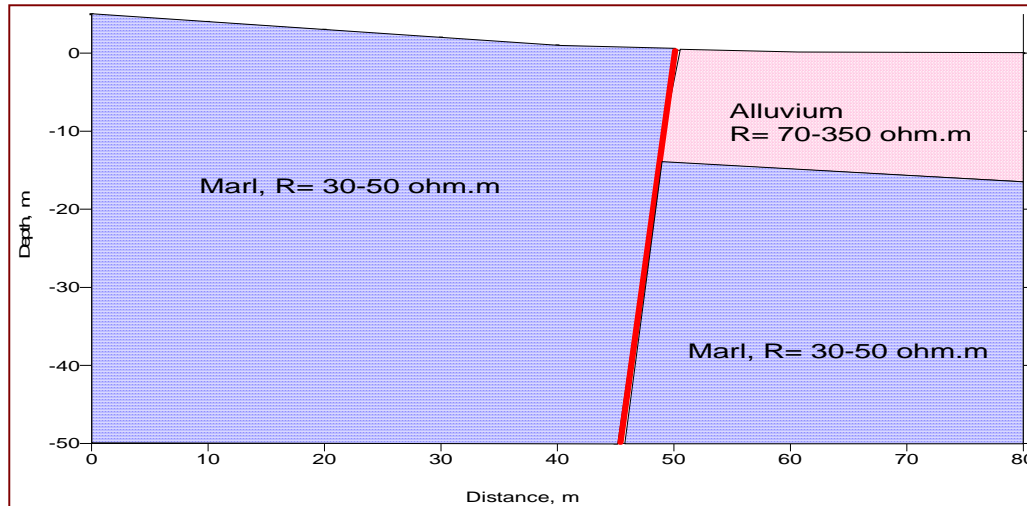


ج- نقشه هم مقاومت ظاهری ( $AB=40m$ )

عمق حدود ۸ متری

شکل ۱۵. نقشه هم مقاومت ویژه الکتریکی در شبکه ای به طول  $80 \times 90$  مترمربع براساس آرایش چهار گوش دو قطبی- دو قطبی.





شکل ۱۶. مقطع زمین شناسی تهیه شده برای گسل توس براساس تحلیل اندازه گیری های ژئوالکتریک در مجاورت خواجه ربیع.

#### ۸ جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج تحقیقات زمین شناسی، زمین ریخت شناسی، ژئوتکنیک، ژئوالکتریک، ترازیبی، تصاویر ماهواره ای رادار و موقعیت یابی جهانی به طور مشترک ادامه یافتن گسل کواترنری توس به سمت شمال مشهد را تایید می کند. گسل توس در محدوده خواجه ربیع دارای افراز مشخصی است و سنگ کف مارنی در این ناحیه رخنمون یافته است. بررسی وضعیت هندسه گسل با تحقیقات ژئوالکتریک در محدوده نزدیک خواجه ربیع، گسل توس را گسلی معکوس با شیب به سمت جنوب غرب نشان می دهد. با توجه به ساخت و سازهای گسترده و پروژه های مهم نظیر الماس شرق در ناحیه شمال شهر مشهد لازم است به خطر زمین لرزه - گسلش ناشی از فعالیت این گسل توجه ویژه شود.

#### منابع

زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. امبرسیز، ن. ن. و ملویل، ج. پ.، ۱۹۸۲، تاریخ زمین لرزه های ایران، ترجمه رده، ا.، انتشارات آگاه، تهران، ۱۳۷۰. بربریان، م. و قرشی، م.، ۱۳۶۸، گزارش بررسی های لرزه زمین ساختی، خطر زمین لرزه - گسلش و مهندسی طرح نیروگاه حرارتی نیشابور، وزارت نیرو، شرکت سهامی خدمات مهندسی برق (مشانیر)، تهران. بربریان، م.، قریشی، م.، ارژنگ روش، ب. و مهاجر اشجی، آ.، ۱۳۶۴، پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت و خطر زمین لرزه - گسلش در گستره تهران و پیرامون، سازمان زمین شناسی کشور، گزارش شماره ۵۶. بربریان، م.، قریشی، م.، شجاع طاهری، ج. و طالبیان، م.، ۱۳۷۸، پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت و خطر زمین لرزه - گسلش در گستره مشهد- نیشابور، سازمان زمین شناسی کشور، گزارش، شماره ۷۲. حافظی مقدس، ن.، آزادی، ا. و مقتدر، م.، ۱۳۸۵، گزارش

آقابیاتی، س. ع.، ۱۳۸۳، زمین شناسی ایران، سازمان

- Loke, M. H., 2003, 2-D and 3-D electrical imaging survey, Geotomosoftware, Penang, Malaysia.
- Loke, M. H., 2005, Rapid 2-D and 3-D resistivity & IP inversion using the least squares method. Geotomo software, Penang, Malaysia.
- Melville, C. P., 1978, Arabic and Persian source material on the historical seismicity of Iran from the 7th to the 17th centuries A.D., Ph.D. Thesis, Cambridge University, U.K.
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzell, H.-U., Zschau, J. and Arabi, S., 2007, Land subsidence in Mashhad Valley, Northeast Iran: results from InSAR, leveling and GPS. *Geophys. J. int.*, **168**, 518-526.
- Trifonov, V. C. and Machette, M. N., 1993, The world map of major active fault project, *Ann. Geofis.*, **36** (3-4), 225-236.
- University of Tehran, Institute of Geophysics, Iranian Seismic Telemetry Network, 2008, Bulletin Search, available online data bank at <http://irsc.ut.ac.ir/>.
- USNRC, 1973, United States, Nuclear-Regulatory Commission Regulatory guide, 1:60, 10 CFR.
- ژئوفیزیک و زمین‌شناسی ریزپهنه‌بندی شهر مشهد، سازمان زمین‌شناسی مشهد.
- حافظی مقدس، ن. و قائم‌مقامیان، م.، ۱۳۸۴، گزارش مطالعات میکروترمور ریزپهنه‌بندی شهر مشهد، سازمان زمین‌شناسی مشهد.
- حسامی آذر، خ.، ۱۳۸۵، گزارش لرزه‌زمین‌ساخت پروژه مقاومت‌سازی بارگاه امام رضا (ع)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- سازمان آب منطقه‌ای خراسان، ۱۳۶۳، گزارش ژئو الکترونیک دشت مشهد، سازمان آب منطقه‌ای خراسان.
- شرکت ملی نفت ایران، ۱۹۷۷، نقشه زمین‌شناسی ایران به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰، شرکت ملی نفت ایران، واحد اکتشاف و تولید، برگه سه از شش.
- میرزایی، ن.، قیطانچی، م. ر.، ناصریه، س.، رئیسی، م.، ظریفی، ز. و طبایی، س. ق.، ۱۳۸۱، پارامترهای مبنایی زمین‌لرزه‌های ایران، انتشارات دانش‌نگار، تهران.
- Berberian, M. and King, G. C. P., 1981, Toward a paleogeography and tectonic elevation of Iran, *Can. J. Earth Sci.*, **18**, 210-265.
- Busby, J. P., 2000, The effectiveness of azimuthally apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations, *Geophys. Prospect*, **48**, 677-695.
- Harvard University, Department of geological science, 2000, Centroid Moment Tensor (CMT) catalogue available online at [www.seismology.harvard.edu](http://www.seismology.harvard.edu).
- IIIES, Seismological Research Centre, 2008, Earthquake Catalogue Search, available online at [www.iiies.ac.ir](http://www.iiies.ac.ir).
- Kondorskaya, N. V. and Shebalin, N. V. (eds.), 1977, *Novii Katalog Silnrkh Zemletriasenii na territory SSSR, Do 1975g*, Izd. Akad. Nauk., S.S.S.R. Moscow. (New Catalogue of Strong Earthquakes in the USSR from ancient times through 1977).