

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری

نشریه فنی

**ارائه روش سیستماتیک مطالعه زمین لغزش ها مبتنی بر
کاوش های زمین شناختی، ژئوتکنیکی و ژئوالکتریکی
(مطالعه موردی: زمین لغزش افسر آباد، استان
چهارمحال و بختیاری)**

نویسندگان:
سید نعیم امامی، معصومه منصوری

شماره ثبت:

۱۴۰۴

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری

نشریه فنی:

ارائه روش سیستماتیک مطالعه زمین لغزش ها مبتنی بر کاوش های زمین شناختی، ژئوتکنیکی و ژئوالکتریکی (مطالعه موردی: زمین لغزش افسرآباد، استان چهار محال و بختیاری)

نویسندگان:

سید نعیم امامی، معصومه منصوری

شماره ثبت: ۶۸۴۴۴

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری

عنوان: ارائه روش سیستماتیک مطالعه زمین لغزش‌ها مبتنی بر کاوش‌های زمین‌شناختی، ژئوتکنیکی و

ژئوالکتریکی (مطالعه موردی: زمین لغزش افسرآباد، استان چهارمحال و بختیاری)

نویسندگان: سید نعیم امامی، معصومه منصوری

ویراستار: سعید نبی‌پی لشکریان

صفحه‌آرایی و طراحی جلد: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

شمارگان: ۱۰ نسخه

تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۴

این اثر در مورخه ۱۴۰۴/۰۹/۱۵ با شماره ۶۸۴۴۴ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطلب، تصاویر، جداول، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر مأخذ بلامانع است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	۱
۱- مقدمه	۲
۲- بررسی منابع و پیشینه تحقیق	۳
۳- موقعیت جغرافیایی و اقلیمی محدوده پژوهش	۴
۴- روش کار	۵
۴-۱- مطالعات دفتری و تحلیل اسنادی	۶
۴-۲- عملیات صحرایی	۷
۴-۳- آزمایش‌های ژئوتکنیکی و مکانیک خاک	۷
۴-۴- تحلیل عددی و مدل‌سازی پایداری	۷
۵- نتایج	۸
۵-۱- زمین‌شناسی و چینه‌شناسی	۸
۵-۲- زمین‌ریخت و چینه‌شناسی توده لغزیده	۹
۵-۳- هندسه و مشخصات زمین لغزش	۱۰
۵-۴- کانی‌شناسی مصالح درگیر در لغزش	۱۳
۵-۵- خواص ژئوتکنیکی مصالح درگیر در لغزش	۱۶
۵-۶- تحلیل پایداری عددی با نرم‌افزار Plaxis	۱۶
۵-۷- نتایج کاوش‌های ژئوالکتریک	۲۱
۵-۷-۱- بررسی سنگ‌شناسی با آرایه شلومبرگر	۲۱
۵-۷-۲- تحلیل سطح گسیختگی با آرایه دوقطبی-دوقطبی	۲۱
۶- نتیجه‌گیری	۲۲
۷- پیشنهادها	۲۳
۷-۱- تقویت جایگاه روش ژئوالکتریک در مرحله شناسایی اولیه	۲۳
۷-۲- تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی در مدل‌سازی عددی	۲۴
۷-۳- تدوین دستورالعمل ملی برای به‌کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی در مطالعات پایداری	۲۴
۷-۴- کنترل و تثبیت دامنه	۲۴
منابع	۲۵
ABSTRACT	۲۸

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده زمین لغزش افسرآباد.....	۵
شکل ۲- نمودار جریانی مراحل انجام کار.....	۶
شکل ۳- نقشه زمین شناسی منطقه افسرآباد (حوزه آبخیز دوآب صمصامی).....	۹
شکل ۴- (الف) نیمرخ زمین شناسی اولیه قبل از وقوع لغزش قدیمی بزرگ و (ب) نیمرخ زمین شناسی کنونی زمین لغزش افسرآباد (پس از لغزش های قدیم و جدید) (بدون مقیاس).....	۱۰
شکل ۵- محدوده زمین لغزش افسرآباد (وقوع ۱۳۷۷) بر روی تصویر لندست ۸.....	۱۱
شکل ۶- مرز شمالی لغزش (تاج لغزش).....	۱۲
شکل ۷- مرز شرقی لغزش.....	۱۲
شکل ۸- بلوک دیاگرام زمین لغزش افسرآباد حاصل از نقشه برداری زمینی و تعیین مرز لغزش.....	۱۳
شکل ۹- نتایج آنالیز XRD بر روی نمونه مارن توده لغزشی افسرآباد.....	۱۴
شکل ۱۰- ضریب اطمینان به دست آمده برای لغزش افسرآباد در فصل خشک و فصل تر با استفاده از نرم افزار Plaxis.....	۱۷
شکل ۱۱- کرنش کل محاسبه شده برای مدل لغزش افسرآباد در الف- فصل خشک و ب- فصل تر و نمایشی از سطح لغزشی آن در نرم افزار Plaxis.....	۱۸
شکل ۱۲- جابه جایی افقی محاسبه شده برای مدل لغزش افسرآباد در الف- فصل خشک و ب- فصل تر و نمایشی از سطح لغزش قدیمی و جدید احتمالی در نرم افزار Plaxis.....	۱۹
شکل ۱۳- جابه جایی قائم محاسبه شده برای مدل لغزش افسرآباد در الف- فصل خشک و ب- فصل تر و نمایشی از سطح لغزشی آن در نرم افزار Plaxis.....	۲۰
شکل ۱۴- نیمرخ ژئوالکتریک ۳ آرایه دوقطبی- دوقطبی (منحنی قرمز نشانگر سطح لغزش است).....	۲۲

فهرست جداول

جدول ۱- خلاصه نتایج آزمایشات مکانیک خاک بر روی مارن.....	۱۴
جدول ۲- پارامترهای ژئوتکنیکی مواد درگیر در لغزش افسرآباد.....	۱۵

چکیده

زمین لغزش‌ها از جمله پدیده‌های پیچیده و چندعاملی ژئوتکنیکی در مناطق کوهستانی هستند که سالانه خسارات گسترده‌ای به زیرساخت‌ها، منابع طبیعی و محیط زیست وارد می‌کنند. در این میان، زمین لغزش‌های چرخشی به دلیل ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی و ژئومکانیکی خاص، یکی از فراگیرترین و پرریسک‌ترین انواع حرکات توده‌ای محسوب می‌شوند. شناسایی دقیق عمق و هندسه سطح گسیختگی، پیش‌نیاز اساسی تحلیل پایداری شیب‌ها و طراحی راهکارهای تثبیت است. با توجه به محدودیت‌های فنی و اقتصادی حفاری در دامنه‌های ناپایدار، این نشریه که حاصل پژوهشی چندساله بر روی روش‌های مختلف بررسی و مطالعه زمین لغزش‌ها است، روشی سیستماتیک را با هدف بیشینه صرفه‌جویی در هزینه مطالعات پیرامون سازوکار و ابعاد زمین لغزش‌ها ارائه می‌دهد که با تکیه بر نتایج آن می‌توان برترین گزینه‌های ممکن را برای کنترل و تثبیت این نوع از حرکات توده‌ای طراحی کرد. منطقه مورد مطالعه، زمین لغزش افسرآباد در قلمرو زاگرس مرکزی (غرب استان چهارمحال و بختیاری) است. روش پیشنهادی در این نشریه دربرگیرنده عملیات گام به گام شامل مطالعات زمین‌شناسی و ترسیم نیمرخ‌های چینه‌شناسی قبل و بعد از لغزش، نمونه‌برداری از برش‌های طبیعی دامنه و در صورت فقدان برش طبیعی، حفر تنها یک گمانه برای نمونه برداری و انجام آزمایشات مکانیک خاک به منظور تعیین ضرایب ژئوتکنیکی و در نهایت انجام کاوش ژئو-الکتریک با آرایه دوقطبی - دوقطبی است. براساس نتایج به دست آمده، روش ژئوالکتریک با آرایه دوقطبی - دوقطبی به دلیل توانمندی در تشخیص مرز لایه‌ها، غیرمخرب بودن، سرعت اجرا و پوشش گسترده، به عنوان گزینه‌ای اقتصادی و قابل اعتماد برای شناسایی سطح لغزش و کاهش نیاز به حفاری‌های گسترده توصیه می‌شود. این نشریه با تلفیق روش‌های زمین‌شناسی صحرایی، ژئوفیزیکی و تحلیل عددی، چارچوبی کارآمد، مقرون به صرفه و قابل تعمیم برای مدیریت زمین لغزش در مناطق کوهستانی ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: بررسی‌های زمین‌شناختی، حرکات توده‌ای، روش گام به گام، کاوش‌های ژئوفیزیکی.

۱- مقدمه

زمین لغزش‌ها از جمله مخاطرات زمین‌ریخت‌شناسی مهم و مخرب در نواحی کوهستانی به‌شمار می‌روند که به‌طور مستمر زیرساخت‌های عمرانی، منابع طبیعی و سکونتگاه‌های انسانی را تهدید می‌کنند. کشور ایران به‌دلیل موقعیت تکتونیکی فعال، اقلیم کوهستانی با بارش‌های متمرکز و ساختار زمین‌شناسی پیچیده، یکی از مناطق مستعد بروز انواع حرکات توده‌ای است که در این میان، زمین لغزش‌های چرخشی از رایج‌ترین و مخرب‌ترین آن‌ها محسوب می‌شوند.

شناسایی ویژگی‌های مکانیکی ژئوتکنیکی مصالح زمین‌شناسی درگیر در لغزش، تعیین موقعیت مکانی و هندسه سطوح گسیختگی و برآورد ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها، پیش‌نیازهای اساسی تحلیل رفتار دامنه‌های ناپایدار هستند. روش‌های مرسوم ژئوتکنیکی مانند حفاری گمانه‌های پرتعداد، نمونه‌برداری و آزمایش‌های متعدد مکانیک خاک، در کنار ارائه اطلاعات دقیق اما نقطه‌ای، بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. با توجه به هزینه‌های سرسام‌آور کاوش‌های ژئوتکنیکی و مکانیک خاک، تلاش در جهت طراحی و تبیین روش‌های کم‌هزینه و سهل‌الوصول در جهت شناسایی سازوکار و ابعاد مختلف زمین لغزش‌ها، کمک شایانی به کنترل و تثبیت این نوع از حرکات توده‌ای خواهد کرد.

ترسیم نیمرخ‌های زمین‌شناسی قبل و بعد از وقوع زمین لغزش، نمونه‌برداری محدود از برش‌های طبیعی برای انجام آزمایشات مکانیک خاک و تعیین ضرایب ژئوتکنیکی مورد نیاز برای تحلیل پایداری، استفاده از کاوش‌های ژئوالکتریک می‌تواند گامی مؤثر در جهت تسهیل این مطالعات باشد. به‌منظور تدوین این نشریه، پژوهشی با هدف ارزیابی تطبیقی مطالعات زمین‌شناسی و چینه‌شناسی، روش‌های ژئوتکنیکی و ژئوالکتریکی در تحلیل زمین لغزش چرخشی، در منطقه افسرآباد واقع در زاگرس مرتفع شهرستان کوهرنگ انجام شده است. این منطقه با ویژگی‌های لیتولوژی مارنی-رسی، شیب‌های تند، بارندگی شدید فصلی و فعالیت‌های عمرانی گسترده، مستعد لغزش‌های مکرر است. در پژوهش یاد شده، داده‌های میدانی و آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis تحلیل شده و نتایج برای شناسایی عوامل ناپایداری و ارائه راهکارهای مدیریتی پایدار تفسیر شده‌اند.

۲- بررسی منابع و پیشینه تحقیق

پدیده زمین لغزش در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای از سوی پژوهشگران حوزه‌های زمین‌شناسی مهندسی، ژئوتکنیک و ژئوفیزیک به خود جلب کرده است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این پدیده ناشی از ترکیب پیچیده‌ای از عوامل طبیعی و انسانی است که شامل بارندگی‌های سنگین، شیب‌های زیاد، وجود لایه‌های رسی ضعیف، گسل‌ها، تغییرات سطح ایستایی و مداخلات عمرانی در دامنه‌ها است (Woldesenbet و همکاران، ۲۰۲۳؛ Tang و همکاران، ۲۰۱۱؛ Thakur و همکاران، ۲۰۲۳).

روش‌های ژئوتکنیکی نظیر حفاری گمانه، نمونه‌برداری و آزمایش‌های مکانیک خاک (مانند برش مستقیم، مقاومت محوری، نفوذپذیری و...)، ابزارهای استاندارد برای شناخت ویژگی‌های ژئومکانیکی محیط لغزشی هستند (Bellanova و همکاران، ۲۰۱۸؛ Kabeta و همکاران، ۲۰۲۳). این روش‌ها با وجود دقت بالا، غالباً پرهزینه، زمان‌بر و محدود به نقاط مشخصی از دامنه بوده و در شرایط زمین‌ریختی پیچیده یا مناطق صعب‌العبور با چالش‌های اجرایی مواجه می‌شوند.

در مقابل، روش‌های ژئوفیزیکی به‌ویژه روش مقاومت ویژه الکتریکی (ژئوالکتریک)، به‌دلیل ماهیت غیرمخرب، قابلیت برداشت پیوسته و هزینه بسیار پایین‌تر نسبت به حفاری، به‌طور فزاینده‌ای در مطالعات پایداری شیب‌ها کاربرد یافته‌اند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده از آرایش‌هایی نظیر دوقطبی-دوقطبی و شلومبرگر، امکان شناسایی سطوح لغزش پنهان، نواحی اشباع، تغییرات لیتولوژیکی و ضخامت نهشته‌های رسی را با دقت قابل‌قبول فراهم می‌آورد (Aduagna و Lamessa، ۲۰۲۴؛ Chibani و همکاران، ۲۰۲۳؛ Hadiatska و همکاران، ۲۰۲۳؛ Huayllazo و همکاران، ۲۰۲۳).

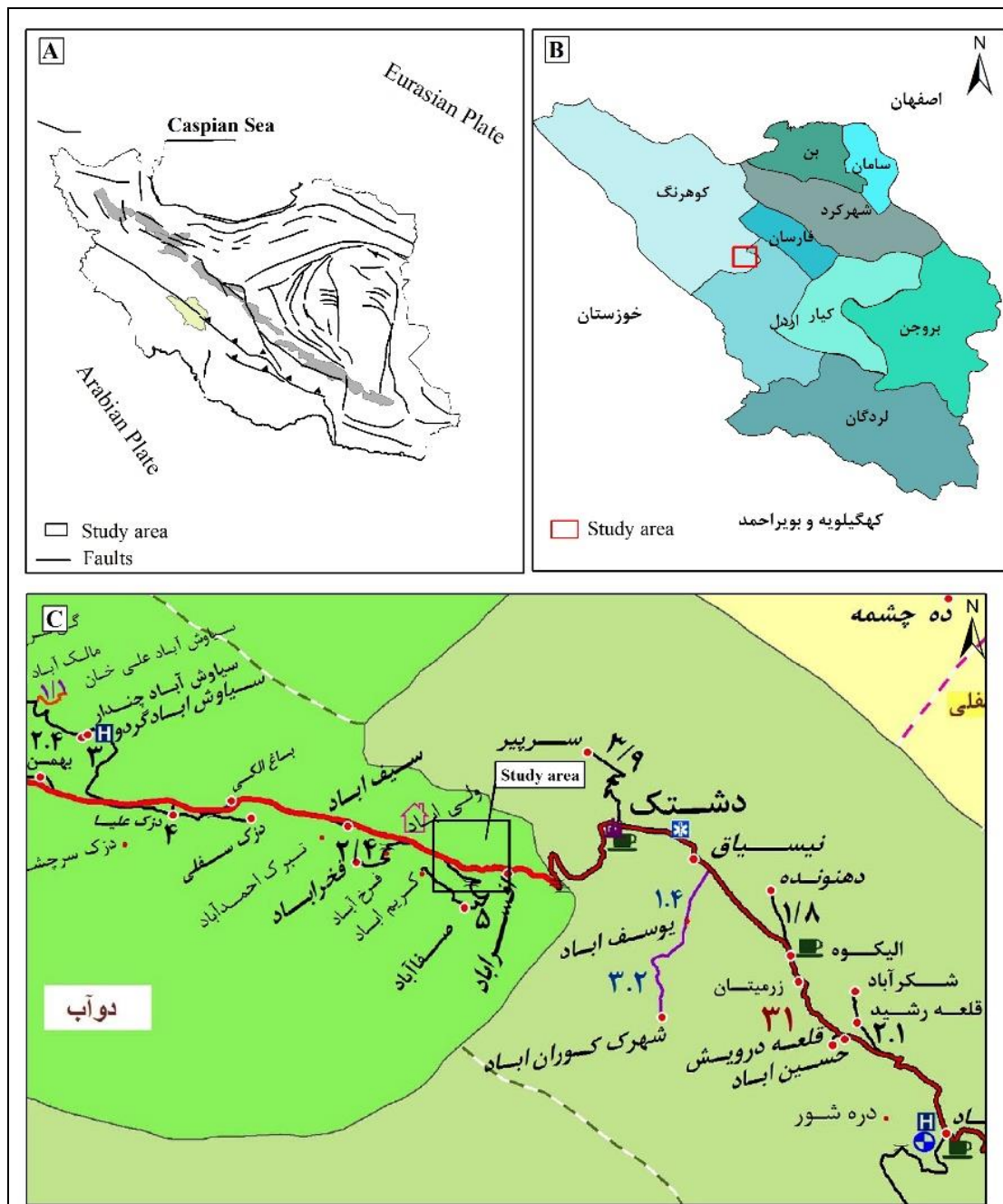
از مزایای برجسته روش ژئوالکتریک، قابلیت تلفیق و هم‌پوشانی با داده‌های ژئوتکنیکی است. این ترکیب موجب افزایش دقت تحلیل‌ها، کاهش نقاط کور زیرسطحی و کاهش هزینه‌های مطالعات می‌شود (Nassim و همکاران، ۲۰۲۴؛ Pasierb و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، برخی مطالعات موفق به یافتن همبستگی کمی مستقیم بین مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری‌شده و پارامترهای ژئوتکنیکی مانند زاویه اصطکاک داخلی خاک شده‌اند (Sangprasat و همکاران، ۲۰۲۳؛ Naseem و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، استفاده از مدل‌سازی

عددی پایداری با نرم‌افزارهایی مانند Plaxis، که پارامترهای ژئوتکنیکی به دست آمده از مطالعات میدانی را به کار می‌گیرد، امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف رفتار دامنه و تعیین حساسیت سیستم به تغییرات فشار آب حفره‌ای و بارهای دینامیکی را فراهم می‌کند (Innocenti و همکاران، ۲۰۲۲؛ Woldesenbet و همکاران، ۲۰۲۳b).

مطالعات تجربی در کشورهای مختلف از جمله ایتالیا، هند، چین، اتیوپی و ترکیه، نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از داده‌های ژئوالکتریک، ژئوتکنیک و تحلیل عددی، رویکردی مؤثر، سریع و مقرون به صرفه برای تحلیل و پایش زمین لغزش‌ها است (Yang و همکاران، ۲۰۲۴؛ Sari و همکاران، ۲۰۲۴؛ Kabeta و همکاران، ۲۰۲۳). در ایران و به ویژه استان چهارمحال و بختیاری، این رویکرد به صورت سیستماتیک کمتر به کار گرفته شده است. در پژوهش انجام شده در استان تلاش شده است این خلأ علمی با به کارگیری هم‌زمان بررسی‌های صحرایی زمین‌شناسی و چینه‌شناسی، روش‌های ژئوالکتریک، ژئوتکنیک و مدل‌سازی عددی پر شود و در نهایت روش مطالعه سیستماتیک و گام به گام الگویی برای تحلیل زمین لغزش‌ها در قالب نشریه فنی ارائه شود.

۳- موقعیت جغرافیایی و اقلیمی محدوده پژوهش

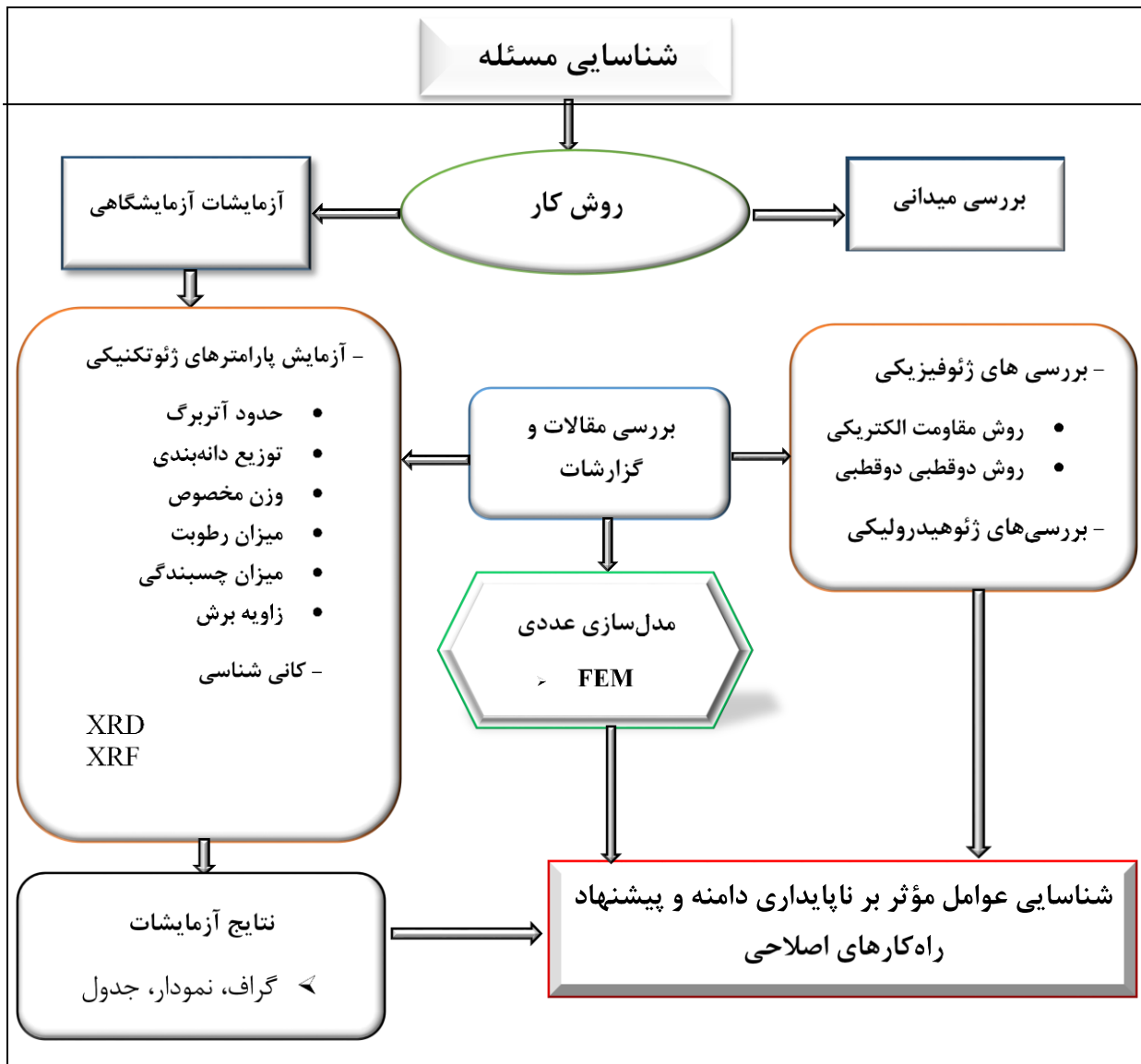
زمین لغزش مورد مطالعه در فاصله ۹۲ کیلومتری غرب شهرکرد، مرکز استان چهارمحال و بختیاری و در محدوده شهرستان کوهرنگ واقع شده است. محل لغزش در فاصله حدود ۲ کیلومتری غرب روستای افسرآباد قرار دارد. مختصات جغرافیایی این پدیده به ترتیب $50^{\circ}24'22''$ طول شرقی و $32^{\circ}09'16''$ عرض شمالی است (شکل ۱). براساس طبقه‌بندی اقلیمی گوسن، منطقه در پهنه اقلیمی استپی سرد قرار دارد و میانگین بارندگی سالیانه آن حدود ۶۳۵ میلی‌متر گزارش شده است. شرایط اقلیمی منطقه، به ویژه بارش‌های متمرکز فصلی، نقش مهمی در تشدید ناپایداری دامنه‌ها ایفا می‌کند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده زمین لغزش افسر آباد

۴- روش کار

روش کار پیشنهادی شامل مطالعات دفتری، عملیات صحرایی، عملیات آزمایشگاهی و تحلیل عددی طراحی است. هدف ارائه مدلی دقیق و گام به گام برای تعیین سازوکار زمین لغزش و مقایسه تطبیقی کارایی روش‌های چینه شناسی، ژئوتکنیکی و ژئوالکتریکی در تحلیل ناپایداری دامنه است. نمودار جریان مراحل تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- نمودار جریان‌ی مراحل انجام کار

۴-۱- مطالعات دفتری و تحلیل اسنادی

در این مرحله، داده‌های پایه مرتبط با منطقه شامل اطلاعات زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، اقلیم، هیدروژئولوژی و هیدروژئولوژی از منابع معتبر مانند گزارش‌های سازمان زمین‌شناسی، نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای و مطالعات پیشین گردآوری شد. تحلیل اولیه شامل بررسی وضعیت زمین لغزش، ویژگی‌های لیتولوژیکی، ساختارهای گسلی و مورفولوژی دامنه با استفاده از این داده‌ها صورت گرفت.

۲-۴- عملیات صحرایی

در این مرحله، بازدیدهای صحرایی به منظور ترسیم نیمرخ های چینه‌شناسی دامنه و استنتاج نیمرخ قبل از لغزش، تعیین محدوده دقیق توده لغزشی، مرزهای تاج و پنجه، جهت حرکت توده، برداشت ساختارهای سطحی و جمع‌آوری داده‌های زمین‌ریخت‌شناسی انجام شد. سه گمانه در موقعیت‌های کلیدی دامنه (افراز، مرکز و پنجه) با عمق ۲۰ تا ۳۰ متر حفر شد و نمونه‌برداری از لایه‌های مختلف خاک و سنگ انجام شد. همچنین به منظور بررسی مقاومت الکتریکی زیرسطحی، دو پروفیل ژئوالکتریک با آرایش دوقطبی-دوقطبی (Dipole-Dipole) با بیشینه فاصله الکترودی ۱۰۰ متر، در عرض دامنه لغزیده اجرا شد.

۳-۴- آزمایش‌های ژئوتکنیکی و مکانیک خاک

نمونه‌های اخذشده از گمانه‌ها برای انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مکانیک خاک به آزمایشگاه منتقل شدند. این آزمایش‌ها شامل موارد زیر است:

- تعیین درصد رطوبت، چگالی و حدود اتربرگ
 - آزمایش برش مستقیم
 - آزمایش نفوذپذیری (فلومتر)
 - آنالیزهای XRD و XRF برای شناسایی ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی خاک‌ها
 - تعیین نوع خاک و درجه پلاستیسیته
- نتایج این آزمایش‌ها برای استخراج پارامترهای ورودی مدل عددی و همچنین مقایسه با نتایج ژئوالکتریک مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۴- تحلیل عددی و مدل‌سازی پایداری

در مرحله نهایی و پس از ترسیم نیمرخ های چینه‌شناسی و اخذ پارامترهای ژئوتکنیکی خاک به‌ویژه زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی مصالح (C) به منظور تحلیل پایداری دامنه، یک مدل دوبعدی از مقطع عرضی دامنه در نرم‌افزار Plaxis2D طراحی شد. داده‌های هندسی از نقشه‌های توپوگرافی و نتایج

ژئوالکتریک، و پارامترهای ژئوتکنیکی از داده‌های آزمایشگاهی^۱ استخراج و در مدل وارد شدند. تحلیل‌ها با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب و روش کاهش پارامترهای مقاومتی^۲ انجام گرفت. ضریب ایمنی دامنه در دو سناریو (خشک و اشباع) محاسبه شد. مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و تفسیر ژئوالکتریک، مبنایی برای ارزیابی دقت روش‌ها در تعیین عمق و هندسه سطح گسیختگی فراهم ساخت.

۵- نتایج

۵-۱- زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

منطقه افسرآباد در زون زمین‌ساختی زاگرس مرتفع^۳ قرار دارد. این زون با ساختارهای پیچیده، گسل‌های متعدد و توپوگرافی ناهمگون، زمینه‌ساز بروز ناپایداری‌های گسترده است. مهم‌ترین خطواره مؤثر در محدوده، گسل معکوس اردل با امتداد شمال‌شرق - جنوب‌غرب است که در فاصله‌ای کمتر از هفت کیلومتر از محدوده عبور کرده و در ایجاد ناپایداری منطقه نقش مؤثری دارد. واحدهای چینه‌شناسی منطقه از قدیم به جدید به شرح زیر هستند (شکل ۳):

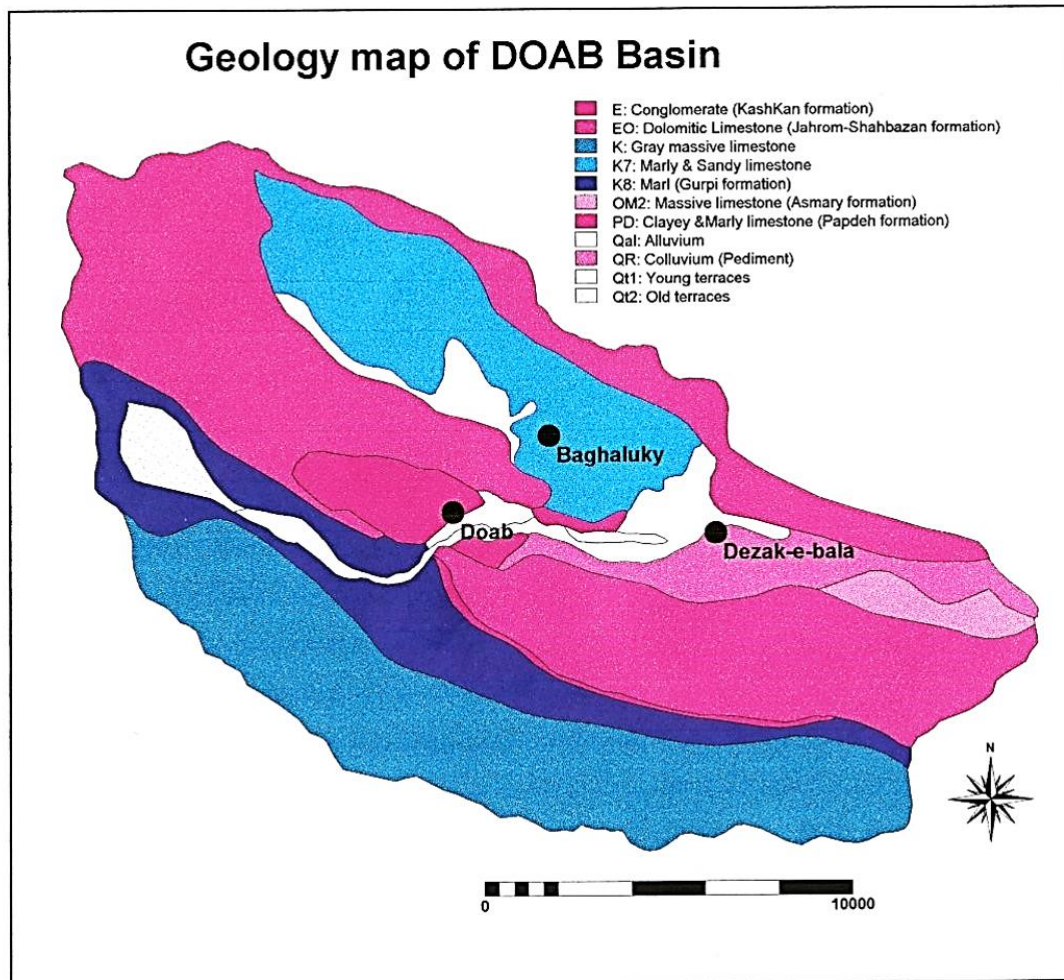
- آهک‌های مارنی فسیل‌دار، آهک ضخیم‌لایه و آهک رسی - ماسه‌ای معادل سازند سروک (K7-K)
- مارن و شیل‌های خاکستری - آبی با میان‌لایه‌های رسی معادل سازند گورپی (K8)
- کنگلومرای قرمز حاوی قطعات چرت، ماسه‌سنگ و سیلت‌سنگ معادل سازند کشکان (E)
- آهک‌های سفید مارنی و دولومیتی معادل سازندهای جهرم و آسماری (EO)
- مارن و آهک نازک‌لایه سازند پابده (pd) که به‌صورت هم‌شیب در قاعده EO قرار دارد.

¹ Mohr-Coulomb

² phi-c reduction

³ High Zagros

- نهشته‌های کواترنری شامل: رسوبات دامنه‌ای (Colluvium) قلوه‌سنگ‌دار (QR)، خاک‌های نابرجای دامنه‌ای (Qt2)، پادگانه‌های آبرفتی سیمانی‌شده حاوی قطعات آهکی (Qt1) و آبرفت‌های سست رودخانه‌ای (Qal)



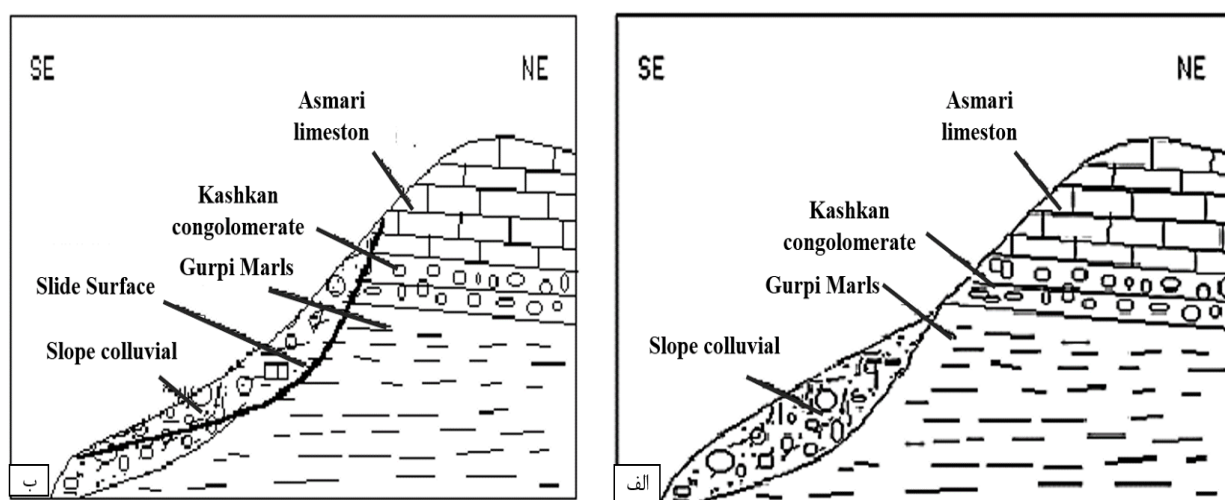
شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی منطقه افسرآباد (حوزه آبخیز دوآب صمصامی)

۵-۲- زمین‌ریخت و چینه‌شناسی توده لغزیده

ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی زمین‌لغزش افسرآباد نشان‌دهنده گسیختگی گوه‌ای در مقیاس بزرگ در نهشته‌های مارنی و آهکی است. وجود دره‌ای با مقطع V شکل و بازشدگی در قسمت بالادست، همراه با قطع شدگی لایه‌های چینه‌ای در بالای دامنه، گویای جداسدگی یک توده عظیم سنگ و خاک شامل مارن‌های

گورپی، کنگلومرای کشکان و آهک‌های جهرم، شهبازان و آسماری است. این توده با سرعت متوسط به سمت پایین دامنه و رودخانه دواب صمصامی رانده شده است (امامی و همکاران، ۱۳۸۰).

براساس مقاطع چینه‌شناسی ترسیم شده (شکل‌های ۴ الف و ۴ ب)، سطوح لغزش قدیمی عمدتاً در لایه‌های کنگلومرای کشکان، آهک‌های شهبازان و مارن‌های گورپی توسعه یافته‌اند و به صورت پیوسته چینه‌های مختلف را درگیر کرده‌اند. لغزش جدید که بر روی نهشته‌های نابرجای دامنه‌ای (QR) رخ داده است، بخشی از توده‌ی قدیمی را که در اثر لغزش‌های پیشین ایجاد شده بود، مجدداً دچار گسیختگی کرده است. همچنین، لغزش‌های ثانویه کوچک‌تری نیز در دل توده‌ی لغزیده، به‌ویژه در پی بارش‌های سنگین و فرسایش آبراهه‌ای، مشاهده شده‌اند که احتمال بروز گسیختگی‌های مجدد در آینده را افزایش می‌دهد.



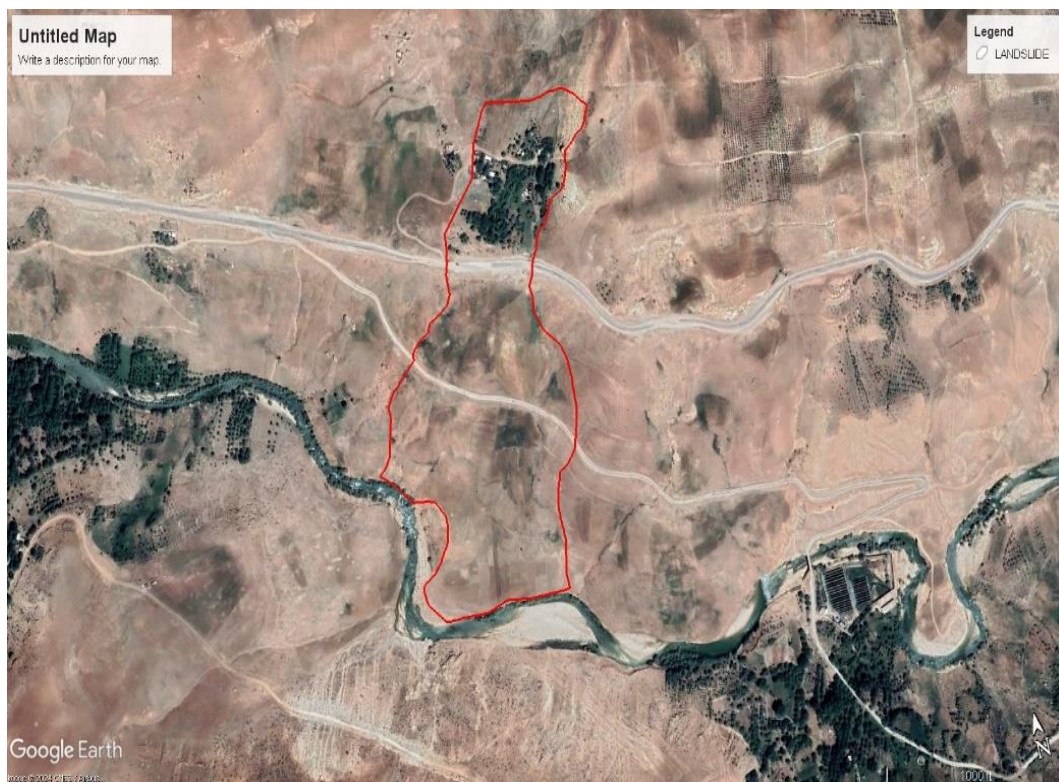
شکل ۴- (الف) نیمرخ زمین‌شناسی اولیه قبل از وقوع لغزش قدیمی بزرگ و (ب) نیمرخ زمین‌شناسی کنونی

زمین لغزش افسرآباد (پس از لغزش‌های قدیم و جدید) (بدون مقیاس)

۵-۳- هندسه و مشخصات زمین لغزش

زمین لغزش افسرآباد از نوع چرخشی (Slump) بوده و در دامنه‌ای رو به جنوب، در پهنه زمین‌ساختی زاگرس مرتفع رخ داده است (شکل ۵). حرکت غالب توده در راستای شمال شرق - جنوب غرب است. طول کلی توده لغزشی حدود ۳۰۰ متر و عرض آن بین ۶۰ تا ۱۴۰ متر متغیر است. ارتفاع متوسط توده از سطح دریا ۱۹۱۸ متر و شیب عمومی آن حدود ۱۵/۵ درجه است. افراز (تاج) لغزش در ارتفاع ۱۹۵۰ متر و پنجه

آن در ۱۸۷۰ متر واقع شده است که اختلاف ارتفاع ۸۰ متری بین دو نقطه ایجاد می‌کند. مساحت کل منطقه لغزشی حدود ۳/۳۳ هکتار اندازه‌گیری شده است. در تاج توده لغزشی، پرتگاه‌هایی با ارتفاع ۵۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر شکل گرفته است (شکل ۶)، درحالی‌که در لبه شرقی توده، پرتگاه‌هایی با ارتفاع ۵۰ تا ۳۰۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود (شکل ۷). مرز غربی توده فاقد پرتگاه شاخص بوده و صرفاً از طریق تحلیل خطوط تراز نقشه‌های توپوگرافی بزرگ‌مقیاس و ترسیم بلوک دیاگرام دامنه قابل تشخیص است (شکل ۸).



شکل ۵- محدوده زمین لغزش افسرآباد (وقوع ۱۳۷۷) بر روی تصویر لندست ۸

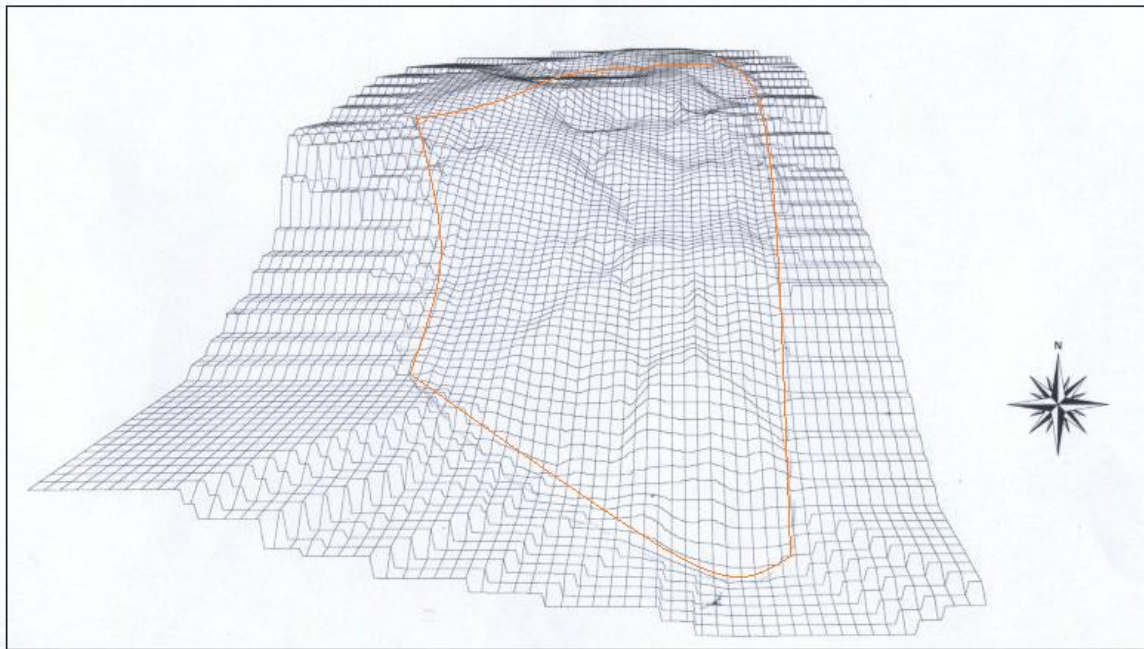
----- تحلیلی بر حساسیت پذیری نسبت به حرکات توده‌ای (زمین لغزش‌ها) در استان چهارمحال بختیاری/۱۲



شکل ۶- مرز شمالی لغزش (تاج لغزش)



شکل ۷- مرز شرقی لغزش

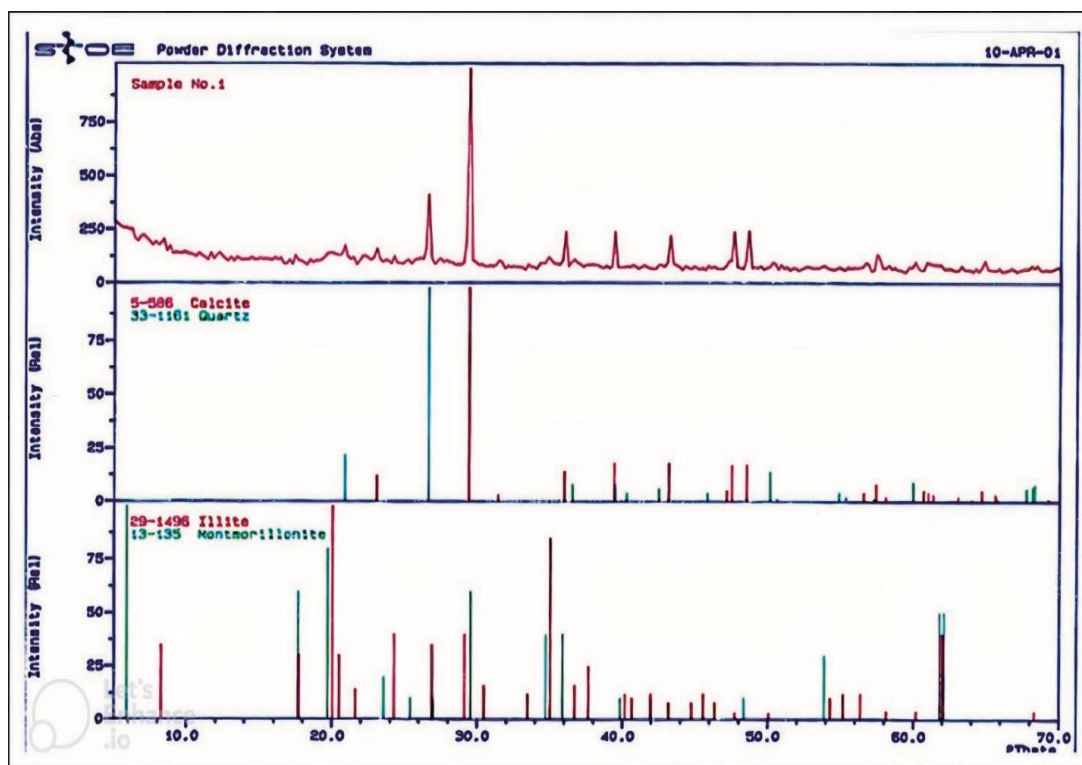


شکل ۸- بلوک دیاگرام زمین لغزش افسرآباد حاصل از نقشه برداری زمینی و تعیین مرز لغزش

۴-۵- کانی شناسی مصالح درگیر در لغزش

با توجه به گسترش قابل ملاحظه و یکپارچه مارن در توده لغزشی، آزمایش XRD پراش اشعه ایکس بر روی یک نمونه مارنی برداشت شده از توده لغزشی انجام شد. نتایج آزمایش نشان دهنده وجود فازهای غالب کلسیت (CaCO_3) و کوارتز (SiO_2) است. همچنین، حضور فازهای رسی نظیر ایلیت و مونت موریلونیت در زمینه سنگ تأیید شد (شکل ۹). حضور مونت موریلونیت با ویژگی انبساط-انقباض بالا، نشان دهنده پتانسیل قابل توجه ناپایداری در شرایط اشباع است (امامی و منصوری، ۱۴۰۳).

-----تحلیلی بر حساسیت پذیری نسبت به حرکات توده‌ای (زمین لغزش‌ها) در استان چهارمحال بختیاری/۱۴



شکل ۹- نتایج آنالیز XRD بر روی نمونه مارن توده لغزشی افسر آباد

جدول ۱- خلاصه نتایج آزمایشات مکانیک خاک بر روی مارن

شماره گمانه	عمق m	طبقه‌بندی یونیفاید	دانسیته (kg/cm³)		حد روانی %LL	شاخص روانی %PI	آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد			
			تر	خشک			۱۵cm نفوذی	۱۵Cm اول	۱۵cm دوم	جمع ۳۰cm
۱	۱	GC			۴۶	۲۴				
			۲/۰۱	۱/۸۴	۴۷	۲۴	۲	۳	۳	۶
		CL			۴۹	۲۶				
					۵۹	۳۲	۳	۴	۴	۸
		GC					۲	۲	۳	۵
		۱/۹۶	۱/۶۷	۴۸	۲۵	۳	۵	۴	۹	
۲	۱	CL			۴۴	۱۸				
					۴۶	۱۹				
		ML	۲/۰۶	۱/۷۹	۴۹	۲۰	۲	۴	۳	۷
			۱/۶۹	۱/۴۸	۴۴	۱۸				
	۴			۱/۷۳	۱/۴۶	۳۹	۱۴	۲	۳	۳

شماره گمانه	عمق m	طبقه‌بندی یونیفاید	دانسیته (kg/cm³)		حد روانی %LL	شاخص روانی %PI	آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد				
			تر	خشک			۱۵cm نفوذی	۱۵Cm اول	۱۵cm دوم	جمع ۳۰cm	
۳	۵	CL	۲/۰۲	۱/۷۳	۵۲	۲۵					
	۱ ۲ ۳ ۴ ۵	CH					۳	۳	۴	۷	
		CL			۴۲	۲۱					
				۱/۹۸	۱/۵۸	۴۵	۲۳				
		GC				۳۹	۱۶				
						۳۸	۱۷				
				۱/۹۹	۱/۸۸	۳۵	۱۵	۲	۲	۶	۸
				۲/۱۱	۱/۹۸			۴	۸	۵	۱۳

جدول ۲- پارامترهای ژئوتکنیکی مواد درگیر در لغزش افسرآباد

پارامترها	پارامترها	لایه اول (CL)	لایه دوم (Ge)	لایه سوم (ML-MH)	لایه چهارم (سنگ مارن)
γ_{unsat} [kN/m ³]	وزن مخصوص خشک	۱۷	۱۶/۹	۱۷	۲۴/۴
γ_{sat} [kN/m ³]	وزن مخصوص اشباع	۲۰/۴۳	۲۰/۳۳	۲۰/۴۳	۲۶/۶
k_x [m/day]	ضریب نفوذپذیری در راستای افقی	۰/۰۰۴	۰/۰۸۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱
k_y [m/day]	ضریب نفوذپذیری در راستای قائم	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱
E_{ref} [kN/m ²]	مدول الاستیسیته مرجع	۳۴۵۸	۱۱۹۳۴/۸۳	۱۶۸۰۰	۵۶۰۰۰
ν	نسبت پواسون	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۲۹
c'_{ref} [kN/m ²]	چسبندگی مؤثر	۱۳	۷	۲۴	۱۰۰۰
$\Phi' [^\circ]$	زاویه اصطکاک مؤثر	۲۳	۲۷	۱۷	۲۸
$*C_u$ [kN/m ²]	چسبندگی زهکشی نشده	۸۳	۱۳	۷۱	-
$*\Phi_u [^\circ]$	زاویه اصطکاک زهکشی نشده	۷	۲۴	۹	-
$\Psi [^\circ]$	زاویه انبساط	۰	۰	۰	۰

* مقادیر زهکشی نشده (Φ_u , C_u) صرفاً برای مقایسه و بررسی رفتار کوتاه مدت خاک در جدول ارائه شده‌اند.

۵-۵- خواص ژئوتکنیکی مصالح درگیر در لغزش

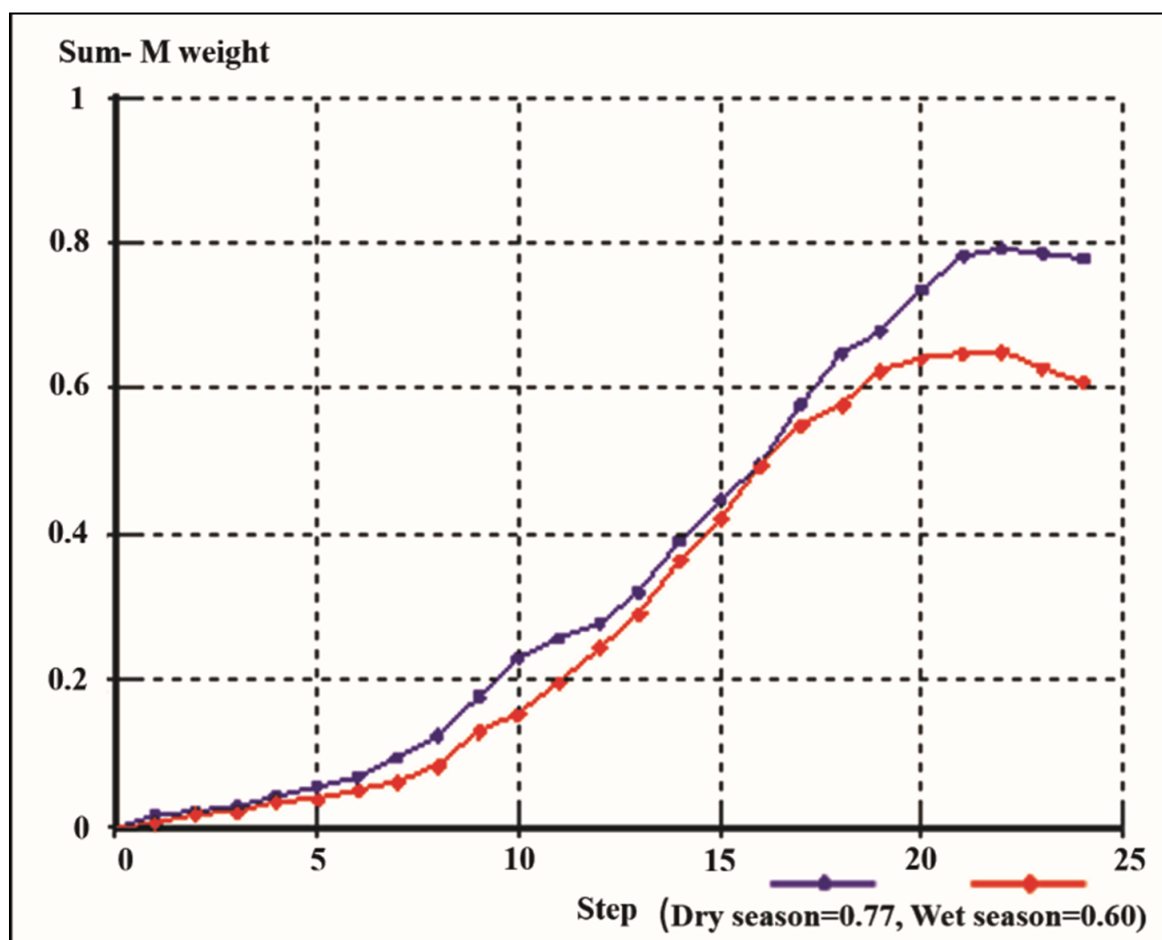
نتایج آزمون‌های مکانیک خاک همراه با پارامترهای ژئوتکنیکی در جداول ۱ و ۲ درج شده است. دامنه لغزیده عمدتاً از خاک با بافت CL (رس با پلاستیسیته پایین) و لایه زیرین از نوع GC (گراول رسی) تشکیل شده است. در اعماق بیشتر، مارن‌های سست و فشرده گسترش دارند که در برخی نقاط تا عمق بیش از ۵۰ متر ادامه می‌یابند. ضریب نفوذپذیری رس سطحی برابر با $5 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ اندازه‌گیری شد که در محدوده‌ی مقادیر گزارش‌شده برای خاک‌های رسی (در حدود 10^{-7} cm/s تا 10^{-5}) قرار دارد و بیانگر زهکشی بسیار ضعیف این لایه است (Das, ۲۰۱۹؛ Craig, ۲۰۰۴). این ویژگی در شرایط بارندگی شدید موجب افزایش فشار منفذی، کاهش مقاومت برشی و در نهایت تشدید پدیده ناپایداری می‌شود. برای تحلیل پایداری بلندمدت دامنه، پارامترهای زهکشی‌شده (c', ϕ') مورد استفاده قرار گرفتند، که موجب افزایش دقت در شرایط طراحی واقعی شود (Berilgen, ۲۰۰۷).

۵-۶- تحلیل پایداری عددی با نرم‌افزار Plaxis

مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 2D و روش اجزای محدود، بر پایه مدل رفتاری موهر-کولمب و تکنیک کاهش پارامترهای مقاومتی^۱ انجام شد. دو سناریوی فصلی (فصل خشک: سطح آب زیرزمینی در عمق ۵ متری، فصل مرطوب: سطح آب زیرزمینی در عمق ۲/۵ متری) تحلیل شدند. ضریب ایمنی دامنه به ترتیب ۰/۷۷ (خشک) و ۰/۶۰ (مرطوب) محاسبه شد (شکل ۱۰). این مقادیر، که کمتر از حد بحرانی (۱) هستند، حاکی از ناپایداری ذاتی دامنه در هر دو شرایط هستند. تحلیل خروجی‌ها (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳) نشان داد سطح گسیختگی اصلی از تاج تا پنجه، در عمق میانگین ۲۸ متر گسترش دارد و بر مرز لایه‌های MH-ML و مارن گورپی منطبق است. در تحلیل کرنش کل و کرنش افزایشی، لغزش ثانویه‌ای نیز در نزدیکی پنجه دامنه شناسایی شد که احتمال وقوع شکست مجدد در بخش‌های پایین‌دست توده لغزشی را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج جابه‌جایی‌ها نشان داد در تاج لغزش، میزان جابه‌جایی قائم به ترتیب در فصل خشک و مرطوب برابر با ۱/۳۱ متر و ۰/۸۷ متر بوده است. بیشینه جابه‌جایی افقی نیز در

^۱ phi-c reduction

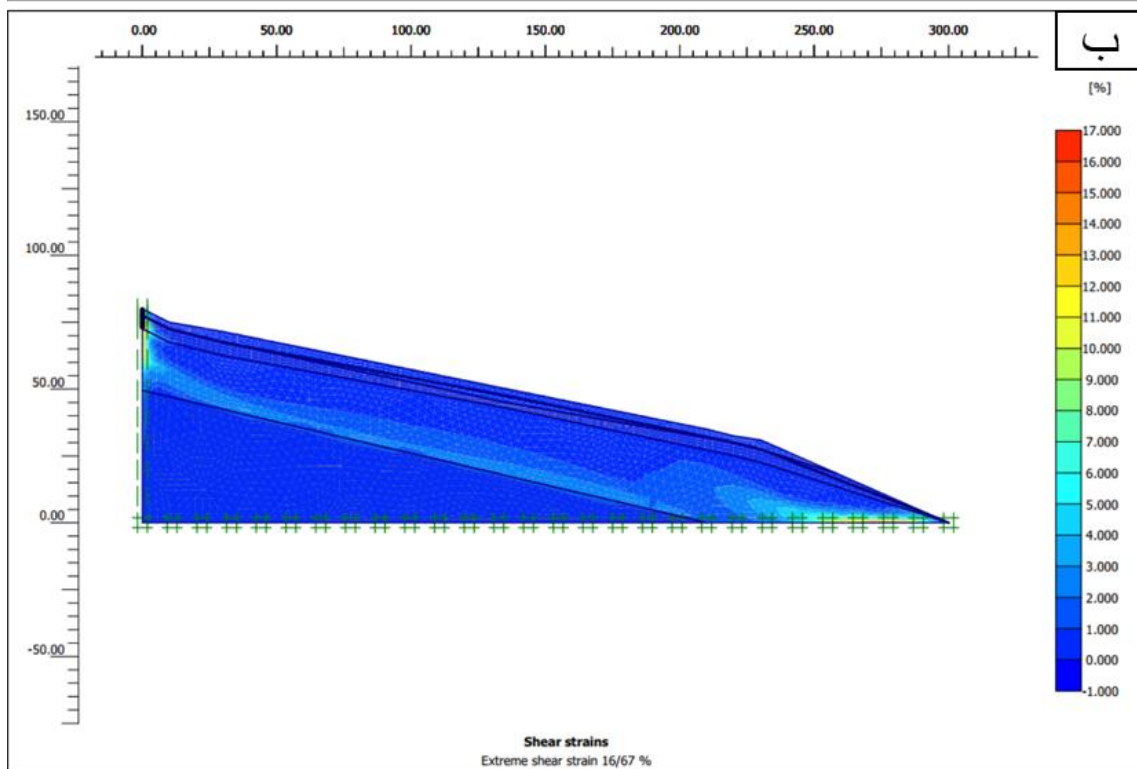
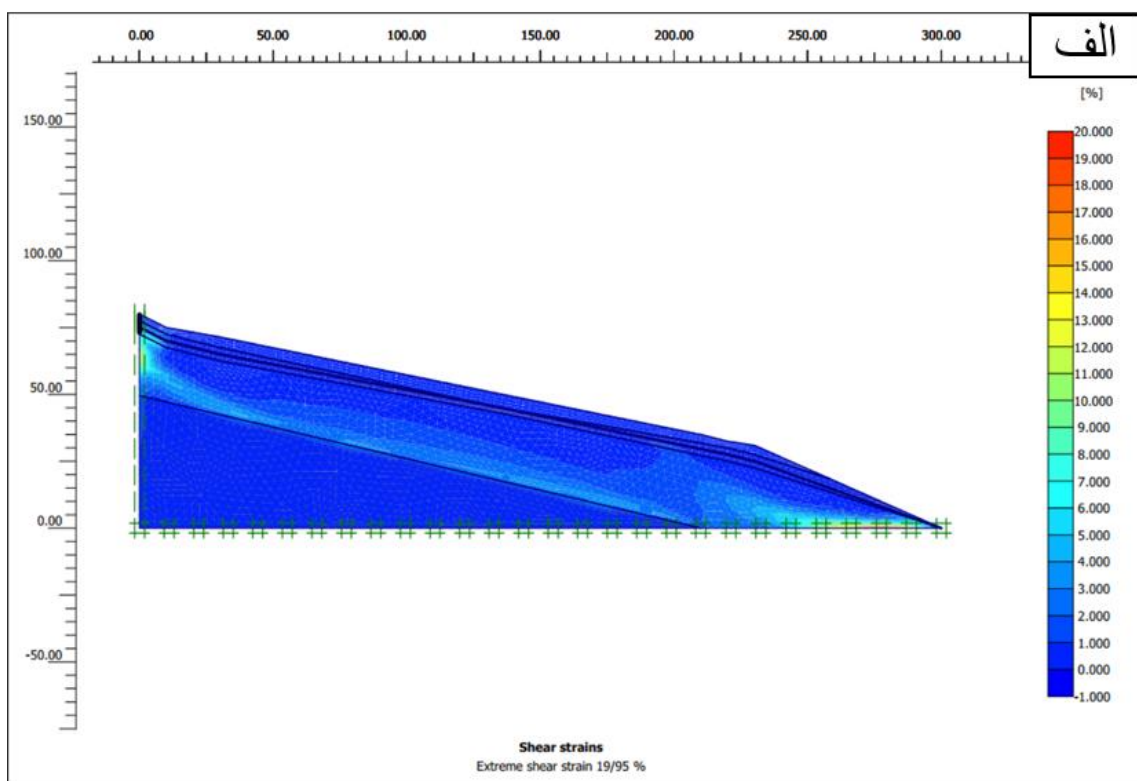
پنجه دامنه، به ترتیب ۰/۶۹ متر در فصل خشک و ۰/۵۳ متر در فصل مرطوب ثبت شده است. این مقادیر بیانگر شدت جابه‌جایی در عمق و ناپایداری در شرایط اشباع هستند (امامی و منصوری، ۱۴۰۳).



شکل ۱۰- ضریب اطمینان به دست آمده برای لغزش افسرآباد در فصل خشک و فصل تر با استفاده از نرم افزار

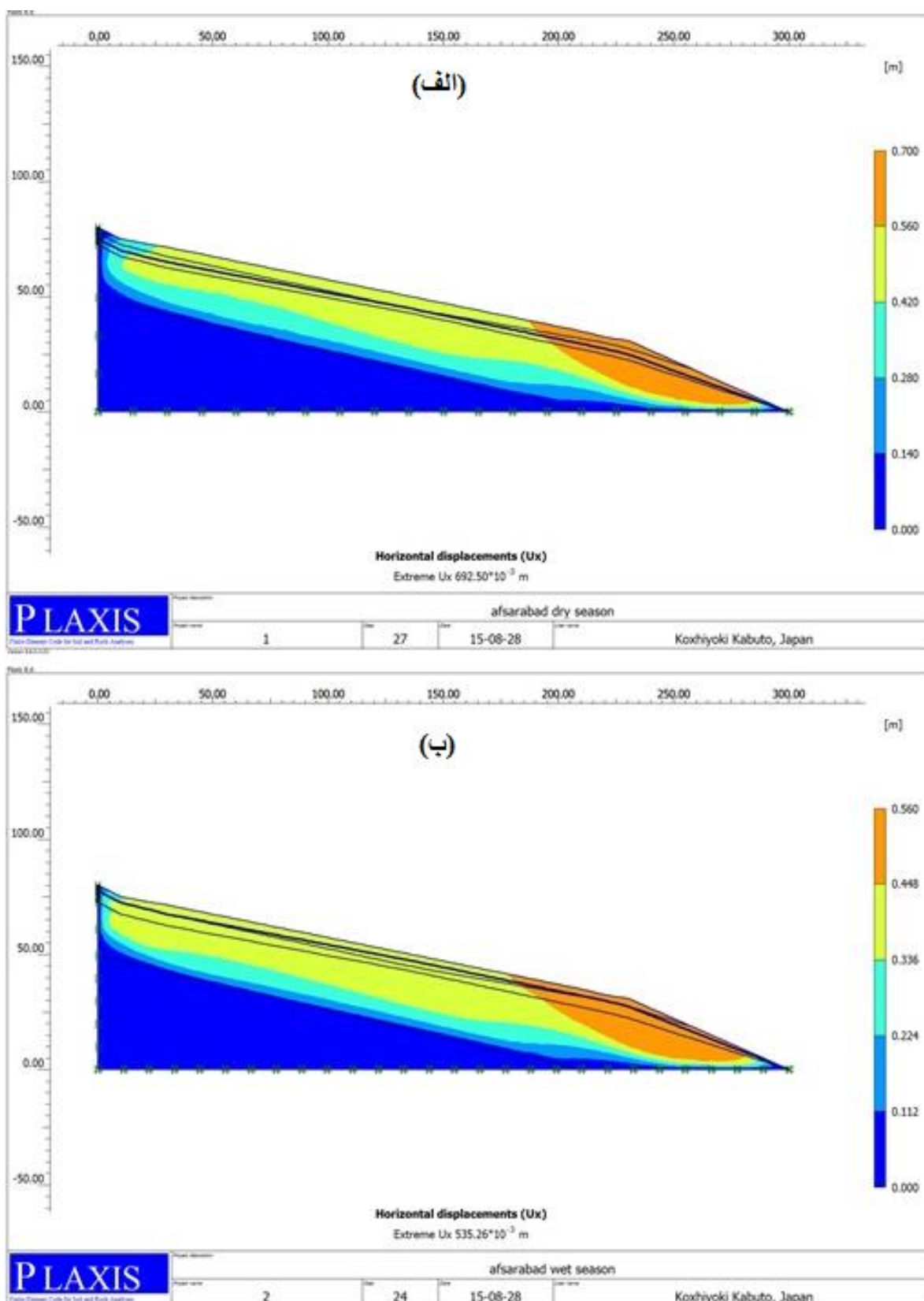
Plaxis

----- تحلیلی بر حساسیت پذیری نسبت به حرکات توده‌ای (زمین لغزش‌ها) در استان چهارمحال بختیاری/ ۱۸



شکل ۱۱- کرنش کل محاسبه شده برای مدل لغزش افسرآباد در الف- فصل خشک و ب- فصل تر و نمایشی از

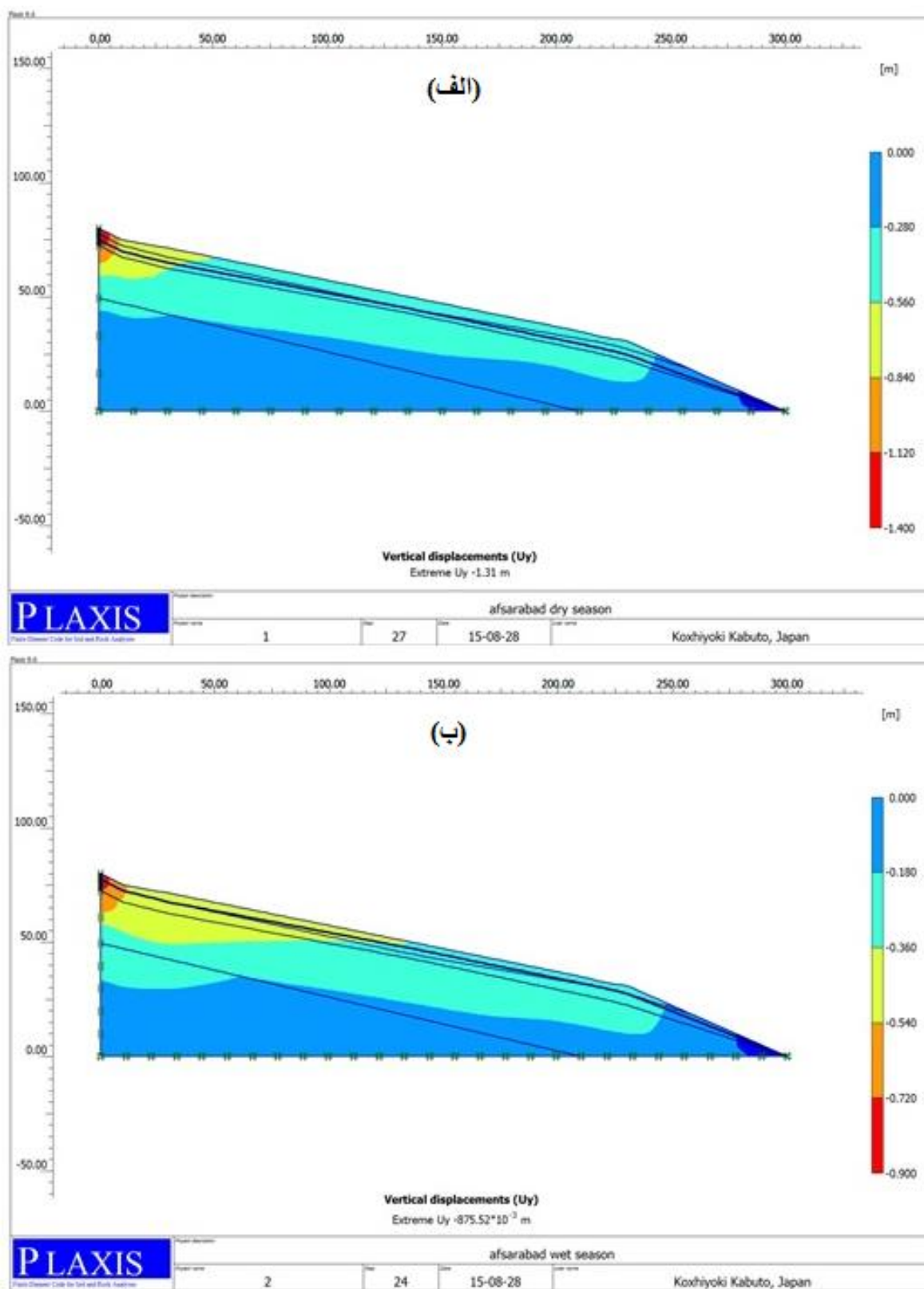
سطح لغزشی آن در نرم افزار Plaxis



شکل ۱۲- جابه‌جایی افقی محاسبه‌شده برای مدل لغزش افسرآباد در الف- فصل خشک و ب- فصل تر و نمایشی

از سطح لغزش قدیمی و جدید احتمالی در نرم‌افزار Plaxis

----- تحلیلی بر حساسیت پذیری نسبت به حرکات توده‌ای (زمین لغزش‌ها) در استان چهارمحال بختیاری/۲۰



شکل ۱۳- جابه‌جایی قائم محاسبه شده برای مدل لغزش افسرآباد در الف- فصل خشک و ب- فصل تر و نمایشی

از سطح لغزشی آن در نرم افزار Plaxis

۵-۷- نتایج کاوش‌های ژئوالکتریک

۵-۷-۱- بررسی سنگ‌شناسی با آرایه شلومبرگر

نتایج حاصل از اجرای آرایه شلومبرگر نشان داد که بدنه اصلی توده لغزشی عمدتاً از مارن‌های ضخیم لایه متعلق به سازند گورپی تشکیل شده است. ضخامت این لایه‌ها حدود ۵۰ متر برآورد شد. در بخش‌های سطحی دامنه، لایه‌هایی با مقاومت ویژه الکتریکی بالاتر شناسایی شد که نشان‌دهنده حضور واریزه‌های درشت‌دانه با زمینه رسی است. این بخش‌ها محل مناسبی برای شکل‌گیری سطوح گسیختگی اولیه به‌شمار می‌روند.

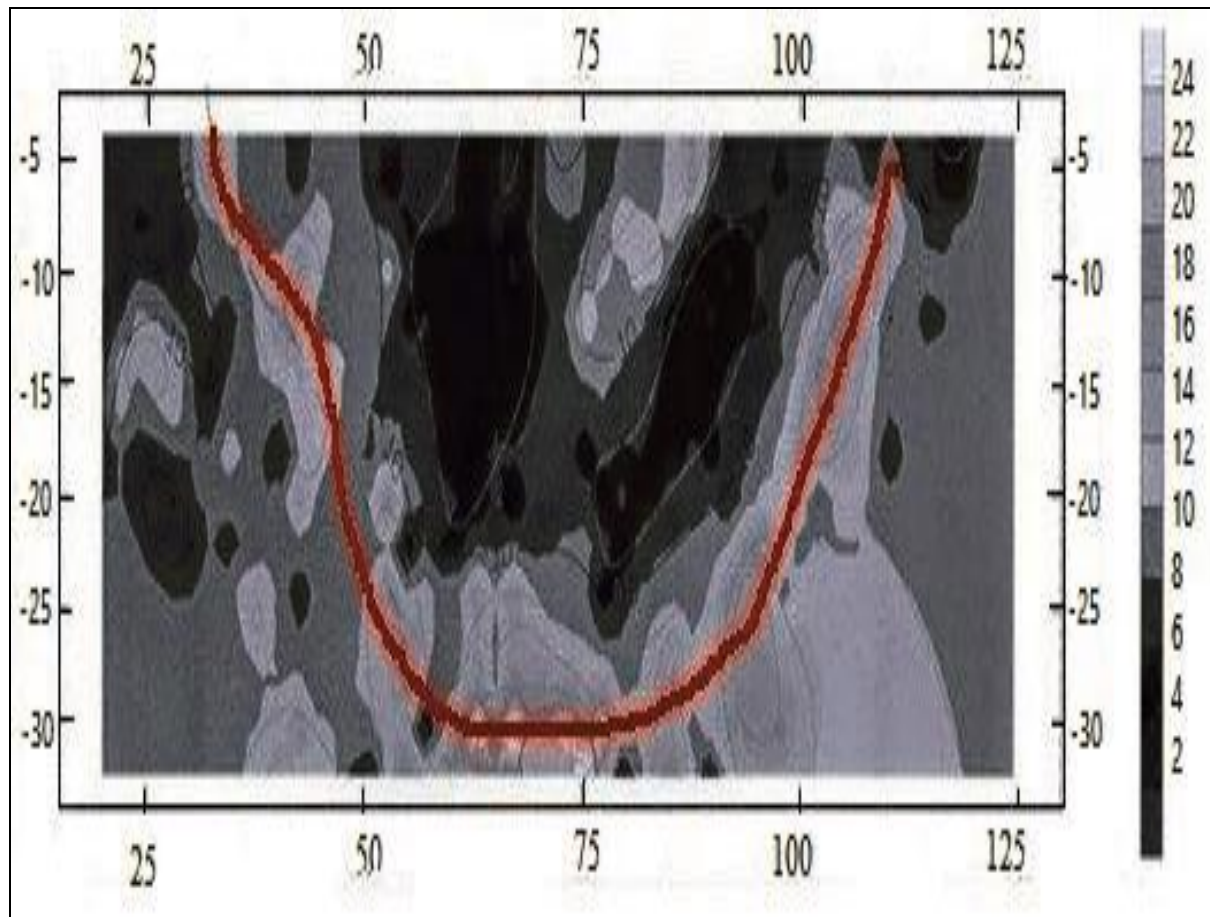
۵-۷-۲- تحلیل سطح گسیختگی با آرایه دوقطبی-دوقطبی

برای شناسایی دقیق‌تر هندسه و عمق سطوح گسیختگی، سه پروفیل ژئوالکتریک با آرایش دوقطبی-دوقطبی^۱ در امتداد عرضی دامنه اجرا شد. نتایج توموگرافی مقاومت ویژه نشان داد که در مقطع میانی دامنه (پروفیل سوم)، سطح گسیختگی اصلی در عمق حدود ۳۰ متر با الگوی خمیده و پیوسته قابل تشخیص است. در برخی مقاطع، زون‌هایی با مقاومت بالا در عمق کم مشاهده شد که نشانگر شکستگی‌های متوالی و احتمال وجود چند سطح لغزش فرعی به‌صورت موازی با سطح اصلی است.

تحلیل تلفیقی داده‌ها نشان داد که نوع لغزش، چرخشی^۲ بوده و در نواحی خاصی از دامنه، ساختار چند لایه‌ای لغزش توسعه یافته است. عمق میانگین گسیختگی براساس نتایج ژئوالکتریک حدود ۲۵ متر برآورد شد که تطابق قابل توجهی با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Plaxis (عمق ۲۸ متر) دارد. این هم‌خوانی، اعتبار روش ژئوالکتریک را در تشخیص مرز لایه‌ها و ساختار زیرسطحی تأیید می‌کند.

^۱ Dipole-Dipole

^۲ slumping



شکل ۱۴- نیمرخ ژئوالکتریک ۳ آرایه دوقطبی- دوقطبی (منحنی قرمز نشانگر سطح لغزش است)

۶- نتیجه‌گیری

مطالعات جامع حاصل از بکارگیری روش گام‌به‌گام شامل مراحل صحرایی، آزمایشگاهی، ژئوالکتریک و مدل‌سازی عددی نشان داد که زمین لغزش افسرآباد، یک لغزش چرخشی عمیق بوده که در درون نهشته‌های مارنی سازند گورپی و در دامنه‌ای با شیب متوسط توسعه یافته است. سطح گسیختگی اصلی در عمق تقریبی ۲۸ متری قرار دارد و سطوح فرعی در اعماق ۱۰ تا ۱۵ متری، از وقوع گسیختگی‌های پیایی و ناپایداری تاریخی در منطقه حکایت دارد.

نکته برجسته و راهبردی در یافته‌های این کار، هم‌پوشانی دقیق نتایج روش ژئوالکتریک (با آرایش دوقطبی-دوقطبی) با داده‌های ژئوتکنیکی و خروجی‌های مدل‌سازی عددی است. این تطابق، نه تنها کارایی و دقت بالای روش ژئوالکتریک در شناسایی هندسه سطوح گسیختگی، لایه‌های اشباع و مرز واحدهای ضعیف

زیرسطحی را تأیید می‌کند، بلکه بر ظرفیت بالای این روش به‌عنوان ابزاری تصمیم‌ساز در فاز مطالعاتی پروژه‌های پایداری شیب‌ها نیز تأکید دارد.

در شرایطی که روش‌های ژئوتکنیکی سنتی مانند حفاری و آزمایش‌های مکانیک خاک، علی‌رغم دقت بالا، با محدودیت‌هایی نظیر هزینه زیاد، دسترسی دشوار، و پوشش نقطه‌ای مواجه هستند، روش ژئوالکتریک با ماهیت غیرمخرب، اقتصادی، سریع و دارای پوشش گسترده، می‌تواند نقش مکمل یا حتی جایگزین مؤثر در مرحله شناسایی اولیه ایفا کند. بهره‌گیری از این روش به‌ویژه در نواحی کوهستانی، لغزشی و کم‌دسترس، نه تنها سبب کاهش هزینه‌های مطالعات می‌شود، بلکه دقت تحلیل‌های نهایی را نیز به شکل معناداری افزایش می‌دهد.

از این‌رو، این مطالعه بر لزوم ارتقاء جایگاه روش ژئوالکتریک در مطالعات زمین‌لغزش، به‌ویژه در پروژه‌های مدیریت ریسک، توسعه زیرساخت و پایش ناپایداری‌های دامنه‌ای در کشور تأکید دارد. توصیه می‌شود، ترکیب هدفمند داده‌های ژئوالکتریک با مطالعات ژئوتکنیکی و مدل‌سازی عددی، به‌عنوان یک رویکرد تلفیقی و مقرون‌به‌صرفه، در دستور کار پروژه‌های آتی قرار گیرد.

۷- پیشنهادها

با توجه به یافته‌های حاصل از بررسی زمین‌لغزش افسرآباد و تجربه تلفیقی در به‌کارگیری روش‌های ژئوالکتریک، ژئوتکنیک و مدل‌سازی عددی، راهکارهای فنی زیر جهت تحلیل، کنترل و پیشگیری از ناپایداری دامنه‌ها در مناطق کوهستانی پیشنهاد می‌شود:

۷-۱- تقویت جایگاه روش ژئوالکتریک در مرحله شناسایی اولیه

در مطالعات اولیه زمین‌لغزش، به‌ویژه در مناطق وسیع، کوهستانی و دارای محدودیت حفاری، بهره‌گیری از آرایش دوقطبی- دوقطبی ژئوالکتریک به‌عنوان روشی سریع، کم‌هزینه و غیرمخرب توصیه می‌شود. توان این روش در تعیین عمق، امتداد و هندسه سطوح گسیختگی، آن را به ابزاری مؤثر برای غربال‌گری مناطق پرخطر و کاهش وابستگی به حفاری‌های گسترده تبدیل کرده است.

۷-۲- تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی در مدل‌سازی عددی

پیشنهاد می‌شود طراحی مدل‌های پایداری شیب، بر پایه ترکیب هدفمند داده‌های ژئوالکتریک، نتایج حفاری و آزمایش‌های مکانیک خاک انجام گیرد. این رویکرد، به‌ویژه در نرم‌افزارهایی نظیر Plaxis، می‌تواند موجب افزایش دقت و قابلیت اطمینان تحلیل‌ها شود. گنجاندن این رویکرد در دستورالعمل‌های رسمی طراحی پروژه‌های عمرانی در مناطق ناپایدار ضروری است.

۷-۳- تدوین دستورالعمل ملی برای به‌کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی در مطالعات پایداری

با توجه به اثبات کارایی روش ژئوالکتریک در این پژوهش، لازم است راهنمایی فنی-اجرایی برای استفاده استاندارد از این روش، نحوه تفسیر داده‌ها، تلفیق با اطلاعات ژئوتکنیکی و بکارگیری در مطالعات مهندسی دامنه تدوین شود. این دستورالعمل می‌تواند در قالب یک آیین‌نامه ملی یا بخش‌نامه تخصصی، در اختیار مهندسین مشاور، نهادهای اجرایی و دستگاه‌های نظارتی قرار گیرد. در نمودار جریانی زیر می‌توان روند مطالعات در دو روش سنتی و روش ژئوالکتریک را ملاحظه کرد (شکل ۱۱).

۷-۴- کنترل و تثبیت دامنه

نتایج حاصل از تحلیل پایداری دامنه نشان می‌دهد که افزایش سطح آب زیرزمینی در پی بارش‌های شدید، موجب افزایش فشار آب منفذی و کاهش تنش مؤثر شده و در نتیجه پایداری دامنه را کاهش می‌دهد. براین‌اساس، مؤثرترین راهکار برای کنترل ناپایداری، احداث سیستم‌های زهکشی سطحی و زیرسطحی در پنجه دامنه و در امتداد توده لغزیده به‌منظور کاهش سطح ایستابی تا عمق حدود ۲۰ متر از سطح دامنه است. همچنین، تعدیل شیب حاشیه جاده تا حدود ۱۲ درجه به روش پله‌ای (تراس‌بندی)، با کاهش سربار و افزایش پایداری موضعی، می‌تواند نقش مؤثری در تثبیت نهایی دامنه داشته باشد.



شکل ۱۱- نمودار جریانی مطالعه زمین لغزش‌ها به دوروش سنتی و نوین پیشنهادی

منابع

- امامی، س.ن.، و منصوری، م. ۱۴۰۳. بررسی و مقایسه کارایی روش‌های ژئوتکنیکی و ژئوالکتریکی در مطالعه زمین‌لغزش‌ها (مطالعه موردی: زمین‌لغزش افسرآباد در استان چهارمحال و بختیاری - جنوب غرب ایران. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۴(۴): ۱۱۲۳-۱۰۹۹. DOI: [10.22055/aag.2024.46751.2452](https://doi.org/10.22055/aag.2024.46751.2452)

– امامی، ن.، غیومیان، ج.، و رئیس‌یان، ر. ۱۳۸۰. گزارش نهایی طرح پژوهشی: بررسی زمین‌لغزش افسرآباد و ارائه روش‌های مناسب پایدارسازی. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان

چهارمحال و بختیاری. ۱۷۲ صفحه.

- Adugna, I., & Lamessa, G. 2024. Integration of 2D and 3D electrical resistivity tomography and 2D gravity modeling to evaluate groundwater investigations in the Burka Uke catchment area, western Ethiopia. *Discover Geoscience*, 2: 72. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00074-6>.
- Bellanova, J., Calamita, G., Giocoli, A., Luongo, R., Macchiato, M., Perrone, A., ... & Piscitelli, S. 2018. Electrical resistivity imaging for the characterization of the Montaguto landslide (southern Italy). *Engineering Geology*, 243: 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.014>.
- Berilgen, M. M. 2007. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics*, 34(2): 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.004>.
- Chibani, A., Hebbache, K., Mellas, M., & Mabrouki, A. 2023. 2D electrical resistivity tomography (ERT) investigation of a landslide: A case study from Ali Mendjeli, Constantine, North-East of Algeria. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 12(1): 45–57. <https://doi.org/10.1080/20909977.2022.2163787>.
- Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, M., & Vlaicu, M. 2011. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences*, 63(2), 397–406. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0724-y>.
- Craig, R. F. 2004. *Craig's Soil Mechanics* (7th ed.). Spon Press. 458 p.
- Evans, S. G., Roberts, N. J., Ischuk, A., Delaney, K. B., Morozova, G. S., & Tutubalina, O. 2009. Landslides triggered by the 1949 Khait earthquake, Tajikistan, and associated loss of life. *Engineering Geology*, 109(3–4): 195–212. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.08.007>.
- Das, B. M. 2019. *Principles of Geotechnical Engineering* (10th ed.). Cengage Learning. 647 p.
- Hadiatska, K., Ivanik, O., Tustanovska, L., Kravchenko, D., & Petrenko, M. 2023. Application on electrical resistivity tomography for local forecasting of landslide

- hazard: A case study from Zadilsk Village, Ukrainian Carpathians. *EAGE Workshop Proceedings*, 1-5, 2023. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500044>.
- Huayllazo, Y., Infa, R., Soto, J., Lazarte, K., Huanca, J., Alvarez, Y., & Teixidó, T. 2023. Using electrical resistivity tomography (ERT) to determine the inner 3D geometry and runoff directions of a large active landslide (Pie de Cuesta, Peru). *Geosciences*, 13(11): 342. <https://doi.org/10.3390/geosciences13110342>.
 - Innocenti, A., Rosi, A., Tofani, V., Pazzi, V., Gargini, E., Masi, E. B., Segoni, S., Bertolo, D., Paganone, M., & Casagli, N. 2023. Geophysical Surveys for Geotechnical Model Reconstruction and Slope Stability Modelling. *Remote Sensing*, 15(8): 2159. <https://doi.org/10.3390/rs15082159>.
 - Kabeta, W. F., Tamiru, M., Tsige, D., & Ware, H. 2023. An integrated geotechnical and geophysical investigation of landslide in Chira town, Ethiopia. *Heliyon*, 9(7): e17620. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17620>.
 - Kumar, M., Sharma, P., & Singh, V. 2023. Geoelectrical imaging of a landslide-prone zone in Himachal Pradesh, India. *Natural Hazards*, 116: 1735–1750. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06051-9>.
 - Nassim, H., Atmane, L., Lamine, H., Mouloud, H., & Anes, M. 2024. Integrated Geotechnical and Electrical Resistivity Tomography to Map the Lithological Variability Involved and Breaking Surface Evolution in Landslide Context: A Case Study of the Targa Ouzemour (Béjaia). *Water*, 16(5): 682. <https://doi.org/10.3390/w16050682>.
 - Naseem, A., De Backer, H., Jalal, F., Schotte, K., & Kashif, M. 2019. Correlation of Electrical Resistivity Test with the Geotechnical Parameters of Sandy Soil. In: *CAJG 2018, Advances in Science, Technology & Innovation*, pp.191–193. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01665-4_45.
 - Pasierb, B., Grodecki, M., & Gwózdź, R. 2019. Geophysical and geotechnical approach to a landslide stability assessment: A case study. *Acta Geophysica*, 67(4): 1823–1834. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00338-7>.
 - Sari, M. 2024. Geophysical and numerical approaches to solving the mechanisms of landslides triggered by earthquakes: A case study of Kahramanmaraş (6 February 2023). *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 55(11): 101758. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101758>.

- Sang, P., Puttywongrak, A., Inazumi, Sh. 2023. Review of Correlations Between Soil Electrical Resistivity and Geotechnical Properties. *Geosciences*, 15(5): 166 p. <https://doi.org/10.3390/geosciences15050166>.
- Tang, C., Zhu, J., Qi, X., & Ding, J. 2011. Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: A case study in the Beichuan area of China. *Engineering Geology*, 122(1–2): 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.013>.
- Thakur, M., Kumar, N., Dhiman, R. K., & Malik, J. N. 2023. Geological and geotechnical investigations of the Sataun landslide, India. *Landslides*, 20(5): 1045–1063. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02038-2>.
- Woldeesenbet, T. T., Arefaine, H. B., & Yesuf, M. B. 2023a. Numerical stability analysis and geotechnical investigation of landslide-prone area: Gechi district, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 13: 100762. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100762>.
- Woldeesenbet, T.T., Telila, T., & Feyessa, F.F. 2023b. Geotechnical investigation of landslides in West Arsi Zone, Ethiopia. *Environmental Earth Sciences*, 82: 427. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11133-5>.
- Yang, W., Zhang, Y., Zhang, L., Bai, G., Wan, B., & An, N. 2024. Comprehensive study on the stability and failure mechanism of landslides under rainfall and earthquake in northwest mountainous areas. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1470083. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1470083>.

Abstract

Landslides are complex and multifactorial geotechnical phenomena in mountainous areas that cause extensive damage to infrastructure, natural resources, and the environment every year. Among them, rotational landslides are considered one of the most widespread and risky types of mass movements due to their specific geomorphological and geomechanical characteristics. Accurate identification of the depth and geometry of the failure surface is a

basic prerequisite for analyzing slope stability and designing stabilization solutions. Given the technical and economic limitations of drilling on unstable slopes, this publication, which is the result of several years of research on various methods for investigating and studying landslides, presents a systematic method with the aim of maximizing cost savings in studies on the mechanism and dimensions of landslides, and based on its results, the best possible options can be designed to control and stabilize this type of mass movements. The study area is the Afsarabad landslide in the Central Zagros region (west of Chaharmahal and Bakhtiari province). The method proposed in this publication includes step-by-step geological studies and stratigraphic profiles before and after the landslide, sampling from natural cuts of the slope and, in the absence of natural cuts, drilling a single borehole for sampling and conducting soil mechanics tests to determine geotechnical coefficients, and finally conducting geoelectrical exploration with a bipolar-bipolar array. The results show that the geoelectrical method with a bipolar-bipolar array is recommended as an economical and reliable option for identifying the landslide surface and reducing the need for extensive excavations due to its ability to detect layer boundaries, non-destructiveness, speed of implementation, and extensive coverage. By integrating field geological, geophysical, and numerical analysis methods, this publication provides an efficient, cost-effective, and generalizable framework for landslide management in mountainous areas.

Keywords: Geophysical Explorations, Geological Surveys, Mass Movements, Step-by-Step Method.

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of
Cheharmahal and Bakhtiari

Title: Presenting a systematic method for studying landslides based on geological, geotechnical, and geoelectrical explorations (Case study: Afsarabad landslide, Chaharmahal and Bakhtiari province)

Authors: Sayed Naeim Emami, Masoumeh Mansouri

Editor: Saeed Nabipay Lashkarian

Page Layout: Abbas Seddigh

Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Circulation: 10 copies

Date of publication: Autumn 2025

This scientific work has been registered with the series number of **68444** at the date of **2025-12-06** the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No part of this publication may reproduced or translated without the original reference.

**Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of
Chaharmahal and Bakhtiari**

Technical Report

Presenting a systematic method for studying landslides based on geological, geotechnical, and geoelectrical explorations (Case study: Afsarabad landslide, Chaharmahal and Bakhtiari province)

Authors:

Sayed Naeim Emami, Masoumeh Mansouri

Series Number: 68444

2025



Ministry of Agriculture - Jihad

Agriculture Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute



Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Chaharmahal Bakhtiari Province

Technical Report

**Presenting a systematic method for
studying landslides based on geological,
geotechnical, and geoelectrical explorations
(Case study: Afsarabad landslide,
Chaharmahal and Bakhtiari province)**

Authors:

Sayed Naeim Emami, Masoumeh Mansouri

Series Number:

2025