چکیده

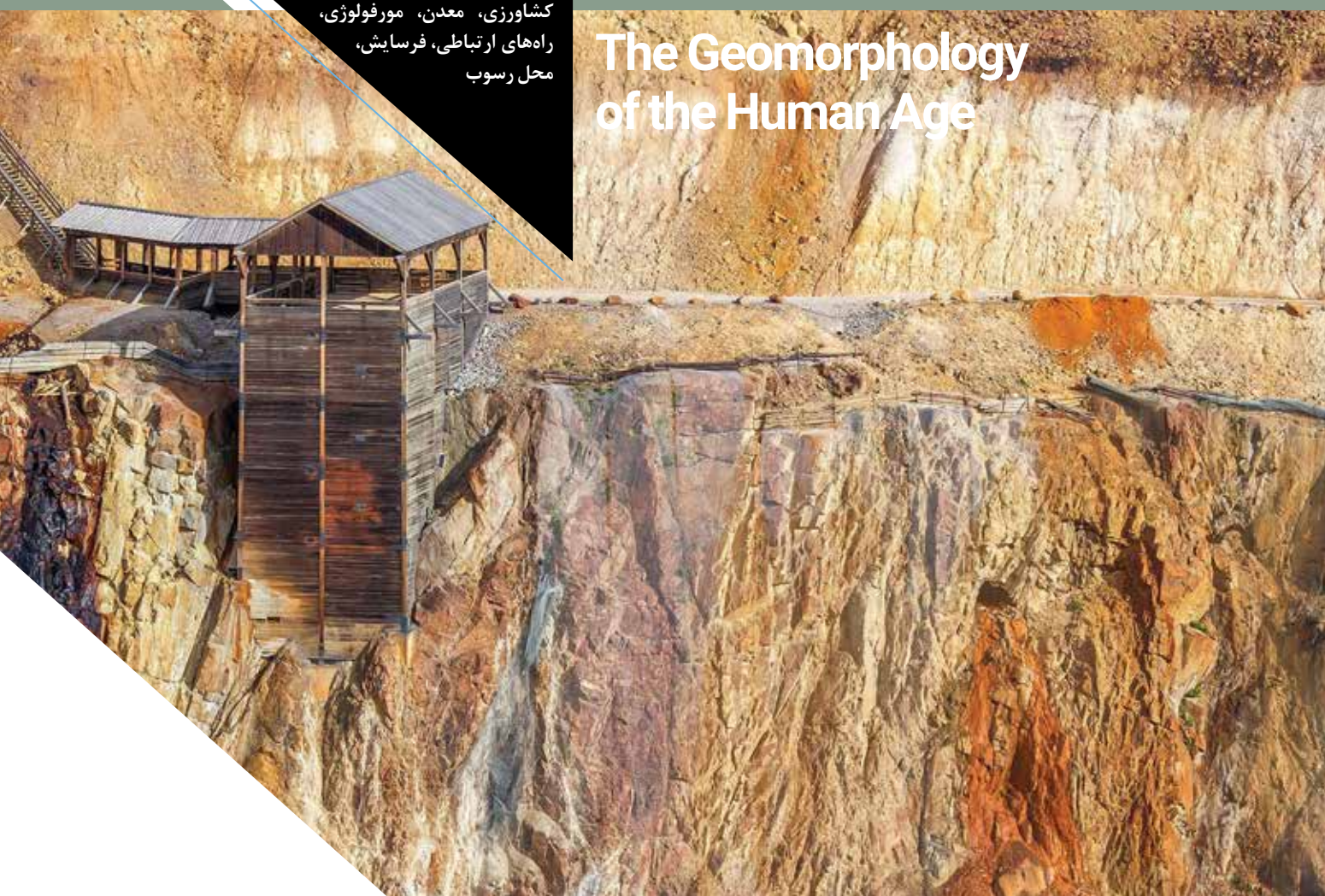
مورفولوژی سطح زمین ناشی از غلبهٔ نیروهایی همچون بالاآمدگی زمین‌ساختی، فرسایش، حمل رسوب و اقلیم است. جامعهٔ علمی زمین، به تازگی اقدام به در نظر گرفتن «زیست» (biota) به‌عنوان یک عامل ژئومورفولوژیک که نقش مهمی در شکل دادن به سطح زمین دارد، کرده است، حتی اگر در بزرگا و مقیاس متفاوتی از سایر نیروهای اصلی دیگر باشد. فعالیت‌های انسانی به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم، حجم زیادی از خاک را جابه‌جا می‌کند که [این اقدام] نشانه‌های توپوگرافی مشخصی بر مورفولوژی زمین می‌گذارد. این نشانه‌ها قابلیت تأثیرگذاری بر فرایندهای سطحی زمین را دارند. این مقاله مروری کلی از نقش انسان به‌عنوان یک عامل زمین‌شناسی در شکل دادن به مورفولوژی سطح زمین ارائه می‌دهد. [در اینجا] چشم‌اندازهای کشاورزی، فعالیت‌های معدنی و شبکهٔ راه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. نمونه‌هایی در مناطق مختلف جهان آورده شده است. در بخش پایانی، نتیجه‌گیری مشاهدات و چالش‌های باز در نظر گرفته شده است، جایی که ما بر چالش‌های آیندهٔ مرتبط با آنتروپی در جامعهٔ علمی زمین تمرکز می‌کنیم.

کلیدواژه‌ها: ژئومورفولوژی، آنتروپی، کشاورزی، معدن، مورفولوژی، راه‌های ارتباطی، فرسایش، محل رسوب

تألیف: دکتر پائولو تارولی (Paolo Tarolli)،
دکتر جولیا سوفیا (Giulia Sofia)،
دکتر ونفانگ کاوو (Wenfang Gao)
ترجمهٔ: دکتر غلامرضا زارع
دانش‌آموختهٔ دکترای جغرافیای طبیعی از دانشگاه تربیت مدرس

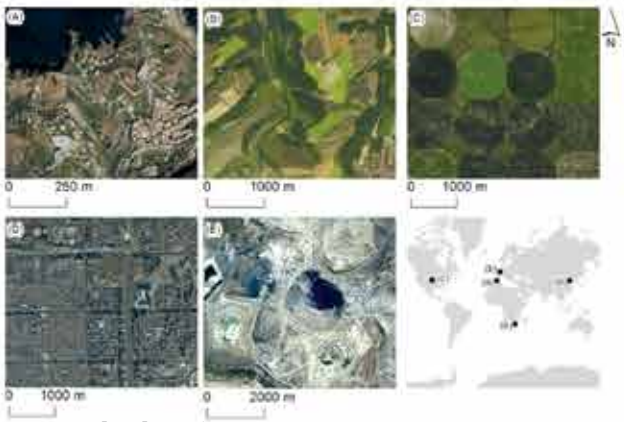
ژئومورفولوژی دورهٔ انسان

The Geomorphology of the Human Age



۱) مقدمه

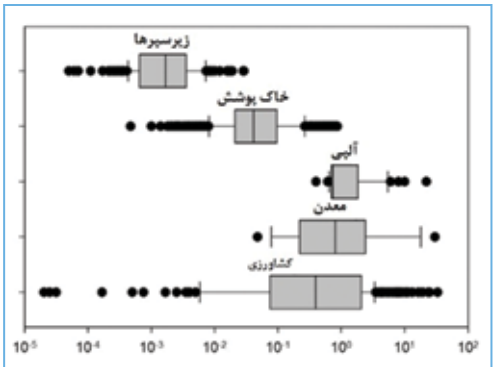
برای هزاران سال، فرایندهای طبیعی همچون بالاآمدگی زمین‌ساختی، آتش‌فشان، اقلیم، فرسایش، انتقال و به‌جاگذاری رسوب، سطح زمین را شکل داده‌اند. با این حال، در سده‌های اخیر، یک نیروی جهانی متفاوت از تغییر ژئومورفیک افزایش یافته است: نیرویی به نام انسان (Price et al., 2011; Hooke and Martin-Duque, 2012; Guthrie, 2015; Waters et al., 2016; Tarolli and Sofia, 2016; Brown et al., 2017; Tarolli et al., 2017). اعم فعالیت‌های انسانی از کشاورزی تا معدن، شبکه راه‌ها و شهرسازی، آثار انگشت خود بر چشم‌اندازها را همچون نشانه‌های توپوگرافی آشکار، به‌جا می‌گذارند (شکل ۱). در حال حاضر، چشم‌اندازهای انسانی، سطح زمین را به‌عنوان بسیاری از اکوسیستم‌های مهم دیگر در سراسر جهان پوشش می‌دهد (Foley et al., 2005). در این چشم‌اندازها، فعالیت‌های انسانی، پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مشخصی را ایجاد می‌کنند (مثل کانال‌های آبیاری، سیستم پلکانی بر تپه‌ها، معدن سطحی). این عوارض می‌توانند آثار قابل‌توجهی مانند فرسایش، رواناب، انتقال و به‌جاگذاری رسوب بر فرایندهای سطح زمین داشته باشند (Tarolli and Sofia, 2016). شناسایی و تحلیل این عوارض و فرایندهای مرتبط، بیانگر یک چالش برای درک تحول چشم‌اندازهای زمین است (Tarolli and Sofia, 2016). اکنون جامعه علمی دربارهٔ این واقعیت بحث می‌کند که ما در یک دورهٔ جدید از زمین‌شناسی زندگی می‌کنیم. این دورهٔ جدید که به آن آنتروپی می‌گویند از نظر کشش جغرافیایی متمایز از هولوسن است (Monastersky, 2015, Waters et al., 2016). با این همه، برخی از نویسندگان تأکید دارند که مجزا کردن چگونگی تأثیرات [فعالیت] انسانی از فعالیت‌های طبیعی هدایت‌شده اغلب دشوار است (Fuller et al., 2015) و برخی دیگر استدلال می‌کنند که ممکن است به زودی آثار انسان بر سوابق زمین‌شناسی، به نتایج تعیین‌کننده‌ای منتهی شوند (Lewin and Macklin, 2014).



شکل ۱: عوارض ژئومورفیک فعالیت‌های انسانی: پلکان در اسپانیا (A)، قطعهٔ [اراضی] کشاورزی در آلمان (B)، کشاورزی با آبیاری محور مرکزی در کانزاس آمریکا (C)، نواحی شهری در چین (D) و معدن در آفریقای جنوبی (E)

با توجه به این مباحث، سؤال این است: آیا می‌توانیم انسان را به‌عنوان یک نیروی زمین‌شناسی تعریف کنیم؟ انسان قابلیت تقویت فرایندهای ژئومورفیک را دارد (Wolf et al., 2014). بازسازی زیستی انسان (بازسازی انسانی) یک پدیدهٔ بدون سابقه در تاریخ زمین است (Zalasiewicz et al., 2014). انسان‌ها به عنصر غالب در بسیاری از فرایندهای سطح زمین در مقیاس‌های مختلف تبدیل‌شده‌اند (Steffen et al., 2007; Wohl, 2013). در این نقطه فعالیت‌های انسانی می‌توانند مجزا از آثار جبری زمین‌ساخت و اقلیم بررسی شوند (Macklin et al., 2014). براساس یافته‌های (Wilkinson, 2005)، انسان‌ها در طی فعالیت‌های ساختمانی متنوع، حجم زیادی از سنگ‌ها و رسوبات را به‌طور فزاینده جابه‌جا می‌کنند و بنابراین یک عامل زمین‌شناسی به حساب می‌آیند. (Tarolli and Sofia, 2016). نرخ فرسایش خاک عملیات معدنی و کشاورزی با مقدار تجمع چشم‌اندازهای پست [با] شیب آرام (زیرسپرها)، تپه‌های شیب متوسط اراضی خاک پوشیده‌شده (خاک پوشش) و توپوگرافی آلپی فعال زمین‌ساختی شیب‌دار (آلپ) مقایسه شدند (Montgomery, ۲۰۰۷).

در شکل ۲، این داده‌ها از طریق جعبه ـ قطعه، خلاصه شده‌اند. بر طبق این تحلیل‌ها نرخ فرسایش فعالیت‌های معدنی و اراضی کشت‌شده از نواحی مختلف عمدتاً بیشتر از نرخ‌های معمول اراضی کوهستانی است. این اعداد نشان می‌دهند که نرخ‌های فرسایش از معدن و کشاورزی در میان بالاترین نرخ‌ها قرار دارند (Garc□a-Ruiz and Lana-Renault, ۲۰۱۱؛ Prosdocimi et al., ۲۰۱۶)، می‌توانند بیش از اغلب فرایندهای فرسایشی طبیعی باشند (Massa et al., ۲۰۱۲). با توجه به چنین نتایجی، ممکن است بتوانیم تا حدی به این پرسش جواب بدهیم که آیا می‌توان انسان را به‌عنوان یک نیروی زمین‌شناسی متفاوت در نظر گرفت. در سه فصل زیر، ما نشانه‌های توپوگرافی مشخص و فرایندهای مرتبط را از طریق نمونه‌های گردآوری‌شده در مناطق مختلف جهان در ارتباط با قطعات [اراضی] کشاورزی، معدن و شبکه‌های حمل‌ونقل (راه‌ها) خلاصه کرده‌ایم.



شکل ۲: نرخ فرسایش خاک در چشم‌اندازهای معدنی در گزارش «Tarolli and Sofia، ۲۰۱۶» تبدیل‌شده به معادل نرخ اراضی پست و برای کشاورزی در گزارش «García-Ruiz et al.، ۲۰۱۵» تبدیل شده به معادل نرخ اراضی پست (فرض بر یک تراکم حجم خاک از kg ۲۰۰۰-۳ برای ساخت‌وساز/معدنی با هم و kg ۱۵۰۰-۳ برای فرسایش خاک در مقیاس تپه‌ای و یک تراکم حجم خاک kg ۱۲۰۰-۳ برای کشاورزی). این‌ها با دامنه نرخ فرسایش چشم‌اندازهای پست شیب آرام (زیرسپرها)، تپه‌های شیب متوسط اراضی خاک پوشیده شده (خاک پوشش) و توپوگرافی آلپی فعال زمین‌ساختی شیب‌دار (آلپ)، منتشرشده توسط مونتگومری (Montgomery، ۲۰۰۷) مقایسه شده‌اند.

گرفته می‌شدند، امروزه [نیز] به‌طور مؤثر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در برخی نواحی، چشم‌اندازهای تراسی می‌توانند [به‌عنوان] یک میراث تاریخی و سرویس اکوسیستم فرهنگی در نظر گرفته شوند. در تمامی حوضه‌های مدیترانه‌ای، چشم‌اندازهای تراسی [به‌عنوان] یکی از مهم‌ترین و مشخص‌ترین اقدامات آنتروپی بر ناهمواری‌ها، مطرح بوده (Dunjó et al., 2003; Trischitta, 2005) و نماد میراث فرهنگی مهمی در اروپا هستند (Varotto, 2008; Arnáez et al., 2011). با این حال، می‌توان، تراس‌های باستانی در آمریکا، خاورمیانه و آسیای شرقی را نیز پیدا کرد. در چشم‌انداز خشک آمریکای جنوبی، فنون آبیاری و ایجاد تراس که توسط قوم اینکاها استفاده می‌شد، امروزه نیز کاربرد دارند. پیش از کلمبیا و مردم بومی فعلی، سیستم‌های آبیاری و تراسی را برای مدیریت بهتر محیط‌زیست و [کاهش] مضرات توسعه داده‌اند (Wil-liams, 2002). در خاورمیانه، هزاران تراس سنگی خشک در دره‌های خشک توسط جوامع پیشین برای مهار کردن رواناب و آب سیلاب‌های ناشی از باران‌های محلی برای فعال کردن کشاورزی در بیابان ایجاد شده است (Ore and Bruins, 2012). در آسیا، ایجاد تراس، یک اقدام کشاورزی گسترده است. از زمان‌های باستانی، امکان شناخت و یافتن تراس در وضعیت‌های توپوگرافی متفاوت وجود دارد (برای مثال تراس‌های تپه‌ای، چشم‌اندازهای دامنه‌های کوهستانی شیب‌دار)، همچنان که از این تراس‌ها برای [کاشت] محصولات مختلف (از جمله

۲) کشاورزی

۲-۱) تراس‌های کشاورزی

تراس‌های کشاورزی یکی از برجسته‌ترین و گسترده‌ترین آثار انسانی در چشم‌اندازهای مختلف جهان است (Tarolli et al., 2014). این تراس‌ها برای حفظ بیشتر آب‌وخاک، کاهش هر دو اتصال هیدرولوژیکی و فرسایش و تأمین آبیاری ساخته شده‌اند. آن‌ها شیب و طول دامنه را کاهش می‌دهند، تسهیل‌کنندهٔ کشت در دامنه‌های شیب‌دار هستند و نفوذ آب در نواحی با نفوذپذیری متوسط تا پایین خاک را افزایش می‌دهند، جریان و سرعت آبراهه سطحی را کنترل می‌کنند و تأثیرات مثبتی بر فعالیت‌های کشاورزی دارند (Perlotto and D'agostino, 2016). از زمان‌های باستانی، می‌توان تراس‌های کشاورزی را در وضعیت‌های توپوگرافی مختلف (برای مثال، نواحی ساحلی، تپه‌ای و چشم‌اندازهای دامنه‌های کوهستانی شیب‌دار) و برای [کاشت] محصولات متنوع (انگور، باغات، برنج، ذرت و گندم) پیدا کرد (شکل A-۳). در چند منطقه، فنون آبیاری و ایجاد تراس که در گذشته به کار

شکل ۳: تراس‌های کشاورزی در اسپانیا و ایتالیا. (A) سیستم تراس محفوظ برای کشت مرکبات در والنسیا (اسپانیا)؛ (B) شکست‌های تراس (فلش سفید) به علت رهاسازی زمین در کورنیگلیا، سینک‌ترا (لیگوریا، ایتالیا)

برنج، ذرت، ارزن، گندم) اســـتفاده می‌کردند. مشاهدهٔ چشم‌اندازهای مذکور، این موضوع را آشـــکار می‌کند که تراس‌های کشاورزی بخش جدایی‌ناپذیر ژئومورفولوژی یک منطقه‌اند، یعنی مکان‌هایی که عوارض ژئومورفیک دارند و منعکس‌کنندهٔ نه‌تنها بالاآمدگی زمین‌ســـاختی یا اقلیم، بلکه حتی [بیانگر] نیروی انسان [نیز] هستند.

با این حال، تراس‌های کشاورزی چند مسئلهٔ حیاتی را مطرح می‌کنند که عبارت‌اند از: افزایش شکســـت‌های شـــیب و فرایندهای فرسایش هیدرولیک با عواقب از دست رفتن مواد مغذی و بازتوزیع مواد شیمیایی. تراس‌های باستانی اغلب از نوع نیمکتی با دیوارهای سنگی هستند و نیاز به نگهداری دارند. تراس‌هایی که طراحی یا نگهداری آن‌ها ضعیف است، به دلیل فرو افتادن تراس‌ها، منابع رسوبی قابل‌توجه را نشان می‌دهند (Brandolini et al., 2017). همچنین راه‌های کشاورزی که در تراس‌ها [قرار گرفته‌اند و] از آن‌ها استفاده می‌شود و ساخت این عوارض آنتروپی می‌تواند آثار عمیقی روی جریان‌های آب و فرســـایش سطحی داشته باشـــند (Tarolli et al., 2015). رها کردن زمین که چندین منطقه از جهان را در طی آخر نیم‌قرن گذشته تحت‌تأثیر قرار داده، باعث افزایش پیشرفت تخریب زمین، به‌ویژه در چشم‌اندازهای تراسی کشاورزی شده است که نتیجهٔ آن، افزایش تدریجی فرسایش خاک و خطر زمین‌لغزش با عواقب مستقیم برای مردم است در زمانی که این فرایندها در نواحی پرجمعیت متراکم، حالت ماشه‌ای [دارند] (شکل B-۳).

۲-۲) فرسایش در کشاورزی

فرسایش آبی خاک بر اراضی کشت‌شده بیانگر تهدیدی شدید برای منابع خاک در جهان و به‌ویژه در نواحی مدیترانه‌ای به دلیل وضعیت‌های اقلیمی، زیستی و توپوگرافی آن‌هاست (Prosdocimi et al., 2016). بر اساس یافته‌های مونتگومری (Montgomery, 2007)، مزارع کشت‌شده از نواحی مختلف عمدتاً با نرخ‌های معمول اراضی آلپی دچار فرسایش می‌شـــوند. نتایج این محقق تأیید کرد که نرخ‌های فرسایشی از مزارع کشاورزی معمولی، یک تا دو رتبه بزرگا، بیشتر از تولید خاک است. بر طبق این مطالعه، کشاورزی مرسوم موجب افزایش نرخ‌های فرسایشی می‌شود که یک اقدام غیرقابل قبول به حساب می‌آید (García-Ruiz et al., 2015). [بر اساس] داده‌های منتشرشده دربارهٔ نرخ‌های فرسایشی خاک (در واحد حجم بر طبق منطقه و زمان)، با توجه به ۴۰۰۰ مکان در سراسر جهان، تحلیلی ارائه شده است. نتایج این تحلیل بر تأثیر کاربری اراضی با بهره‌برداری کشاورزی که دارای بالاترین نرخ فرسایش هستند، تأکید می‌کند. در واقع، نرخ‌های فرسایشی [منتج] از کشاورزی، از جمله بالاترین نرخ‌ها برای کاربری اراضی اســـت (García-Ruiz and Lana-Renault, 2011). از بین اراضی کشت‌شـــده، باید به تاکستان‌ها توجه خاصی شود، زیرا علاوه بر اینکه یکی از مهم‌ترین محصولات برای درآمد و اشتغال هستند، ثابت شده است که شکل کاربری کشاورزی [در این محصولات] به یکی از بزرگ‌ترین تلفات خاک منتهی می‌شود (Prosdocimi et al., 2016).

شـــکل ۴ مثالی از فرسایش خاک یک تاکســـتان در اسپانیا را نشان می‌دهد و حاکی از آن اســـت که فرســـایش ناشی از کشـــاورزی آثار غیرمســـتقیمی بر خشک شـــدن رودخانه، زهکشـــی آب زیرزمینی، آلودگی آب، رســـوب‌گذاری، شور شدن و نفوذ آب شور، دارد (Atapattu and Kodituwakku, 2009). همچنین خاک‌های فرسایش‌یافته در چشم‌اندازهای کشاورزی می‌توانند به شبکهٔ زهکشی (Borselli et al., 2008) با عواقب مســـتقیم بر نرخ‌ها و بزرگای رسوب‌گذاری دشت سیلابی (Doolittle, 2006; Knox, 2006) انتقال یابند.

شکل ۴: رسوبات نهشته شده در امتداد راه ارتباطی به دلیل فرسایش خاک توسط آب در اطراف انگورها، مویسنت، استان والنسیا (اسپانیا)

۲-۳) آبیاری در کشاورزی

آثار انســـانی در دشت ســـیلابی، توزیع فضایی و نرخ‌های فرایندهای ژئومورفیک و هیدرولیک را تغییر داده (Fryirs and Brierley, 2012) و این [موضوع] ممکن است موجب تخریب زمین و تغییرات ژئومورفیک شـــود (Doolittle, 2006). ســـریع‌ترین واکنش در بخش کشاورزی تصمیم به [احداث] شـــبکهٔ کانالی و آبیاری در روند کار کشاورزی بود (Valipour, 2013) (شـــکل ۵). از یک ســـو، آبیاری به‌طور چشمگیر بـــه کاهش فقر، امنیت غذایی و بهبـــود کیفیت زندگی برای جمعیت روســـتایی، کمک کرده و از طرف دیگر، توسعهٔ سیستم زهکشی تأثیر قابل‌توجهی بر تولید و گســـترش رواناب گذاشته است (Goudie and Viles, 2016). دشـــت‌های سیلابی در طی قرن‌ها شاهد تغییراتی در مدیریت آب و توسعهٔ کشاورزی بوده‌اند (Sofia et al., 2014b; Sofia and Tarolli, 2017). مهندسی کانال و پیشرفت‌های کشاورزی دشت سیلابی تغییر شـــکل اتصال کانال- دشت سیلاب و به‌طور کامل، یک دگرگونی عمیق در سیستم رود طبیعی ایجاد کرده است (Brown et al., 2017). [با توجه] به این نکته که سیســـتم دشت سیلابی امروزه کاملاً طبیعی نیســـت (Lewin and Macklin, 2010) و می‌توان [آن را] یک سیستم آب ـ انســـان در نظر گرفت (Di Baldassarre et al., 2013; Viglione et al., 2014)، اغلب اشـــکال معمول کشـــاورزی، پشته‌ها و حفره‌ها به وسیله شـــخم زدن و کانال‌های آبیاری هستند و این الگوها، اهمیت زیادی در تأثیرگذاری رواناب ســـطحی دارند (Kiss and Benyhe, 2015). در حقیقت، سازمان فضایی مدیریت کشاورزی بر هیدرولوژی به‌ویژه در طی رخدادهای سیلاب، تأثیر عمیقی می‌گذارد (Moussa et al., 2002). در مقیـــاس یک قطعه، خاک‌ورزی ضرایب رواناب و نفوذ را [به ترتیب] کاهش و افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، در مقیاس حوضه‌ای، به دلیل خندق‌های بین ـ میدان، شبکه‌های خندقی، محدودهٔ تولید رواناب را گســـترش می‌دهنـــد (Levavasseur et al., 2012)، در حالی که شکل شبکهٔ زمان وقوع سیلاب را کنترل می‌کند. بدون حضور چنین شبکه‌های انسان‌ساخت، حداکثر دبی پایین‌تر خواهد

بود و تقریباً تمامی رواناب، یک رواناب سطحی خواهد شد (Carluer and Marsily, 2004). همچنین، تغییر در نرخ‌های رسوب‌گذاری و منابع رسوب با اجرای زهکشی زمین (Owens and Walling, 2002) و سیستم‌های خاک‌ریزی (Marchetti, 2002) مرتبط است. محرکان اقتصادی، توسعهٔ شبکهٔ زهکشی (Krause et al., 2007; Sofia et al., 2014a; Sofia and Tarolli, 2017) را با تأثیرات بر واکنش هیدرولوژیکی کنترل می‌کنند. هنگامی که گذشته تا زمان کنونی [با یکدیگر] مقایسه شوند، عناصر کلیدی که می‌توانند تفاوت‌ها در واکنش شبکه را کاهش یا افزایش دهند، وضعیت خاک پیشین و ویژگی‌های اقلیمی است (Sofia and Tarolli, 2017). بر اساس مورد ارائه‌شده در مقاله، حوادث بارندگی نامنظم و شدید بیانگر بحران بزرگ‌تر، به‌ویژه برای توفان‌های مکرر است (Camorani et al., 2005; Brath et al., 2006; Sofia and Tarolli, 2017).

شکل ۵: مثالی از یک خندق در چشم‌انداز کشاورزی مرسوم در دشت پادانا (شمال ایتالیا)

۳) معدن

تغییرات در ژئومورفولوژی واکنش به چند عامل پیچیده و متضاد است (Brown et al., 2017). استخراج معادن و منابع، نواحی شهری و تمامی انواع زیرساخت‌ها، بیانگر حدود ۱۳ درصد از این تغییرات است (Hooke and Martin-Duque, 2012). با این حال، معادن مسئولیت بیشتری در تولید رسوب، نسبت به جاده‌های آسفالته و ساخت‌وساز نواحی شهری و کشاورزی دارند (Hooke, 1999). معادن در مقایسه با سایر توپوگرافی‌های انسانی حجم نسبتاً کمتری از اراضی در سراسر جهان را به اشغال درآورده‌اند، اما آن‌ها نشانه‌های مشخصی بر سطح زمین [به‌جا] می‌گذارند (Tarolli and Sofia, 2016). ویژگی اصلی چنین نشانهٔ توپوگرافی، استمرار آن در زمان است. بزرگای این عارضه چنان شدید است که نشانه‌های معادنی از قرن‌ها پیش هنوز در جهان مشاهده می‌شود (Hooke and Martin-Duque, 2012) و بنابراین آن‌ها بر محیط‌زیست اثرگذارند. در بین فنون معدن، استخراج معادن (معدن سطحی)، یک روش بهینه و مقرون‌به‌صرفه برای بهره‌برداری از منابع معدنی است. با این حال، این فناوری جدید معدن، تأثیر قابل‌توجهی بر چشم‌انداز اطراف [خود] دارد. [این فنّاوری] به دلیل نابودی پوشش گیاهی و تغییر دائمی توپوگرافی، خاک و ساختارهای زمین‌شناسی زیرساختی، آثار قابل ملاحظهٔ زیادی دارد و در نتیجه فرسایش خاک و رواناب شتاب می‌یابد (Kilmartin, 1989؛ Holmes et al., 1993; Osterkamp and Joseph, 2000; Nicolau, 2002; Hancock et al., 2006; Rivas et al., 2006; Zhao et al., 2013; Wang et al., 2014).

مکان‌های معدن یا سطح ـ معدنی استخراج یا احیاشده، رواناب سریع‌تری را نسبت به نواحی بکر عرضه می‌کند (Kilmartin, 1989). حتی پس از بازسازی، چشم‌انداز به حاشیه رانده می‌شود و به جای [اینکه] یک چشم‌انداز طبیعی باشد، در وضعیتی شبیه به مناطق شهری می‌ماند (Ferrari et al., 2009). این نتایج در اوج سیلاب بزرگ‌تر، جریان پایهٔ کاهش‌یافته، فاصلهٔ زمان کوتاه‌تر بین بارندگی و اوج سیلاب، شارژ مجدد آب‌های زیرزمینی کاهش‌یافته و بارهای رسوبی بزرگ‌تر در حوضه‌های آبریز متأثرشده، مشاهده خواهد شد (Kilmartin, 1989). همچنین، فعالیت‌های معدنی به‌طور عمیق جریان آب زیرزمینی طبیعی را تغییر می‌دهد و [موجب] افزایش سرعت و کاهش مسیر جریان می‌شود (Holmes et al., 1993). بر اساس یک حادثه، اگر در مقایسه با بیشتر نواحی طبیعی، حوضه‌های آبریز معدن احیا و ضریب رواناب توفانی بزرگ‌تر تولید شود و حوضه‌های آبریز بیشتر باشد، رواناب کلی، بزرگ‌تر و اوج نرخ‌های رواناب ساعتی بیشتر خواهد بود (Negley and Eshleman, 2006).

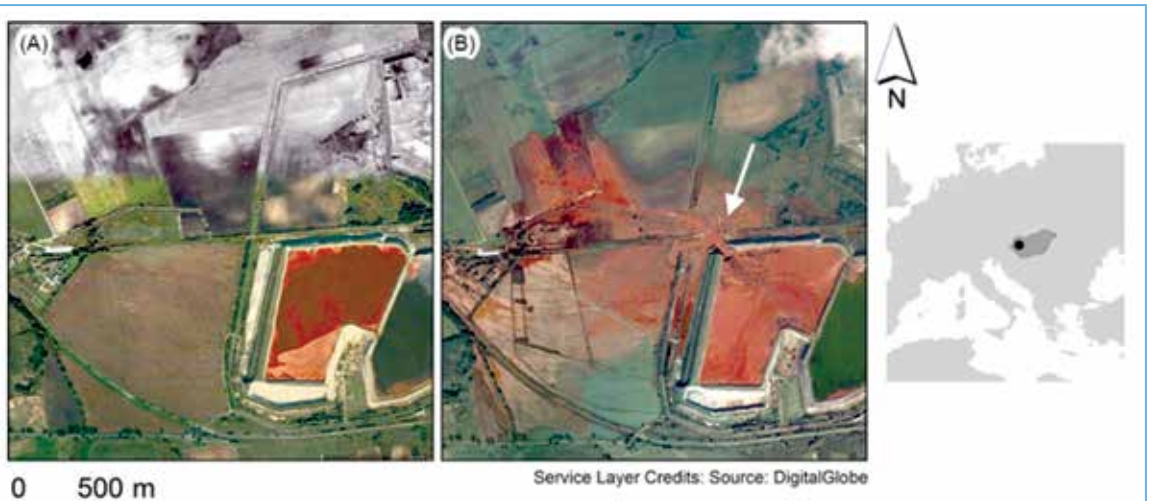
معادن با از بین بردن خاک برای افزایش دسترسی به نهشته‌ها، آغاز می‌شوند. بنابراین بلافاصله پس از شروع معدن روی زمین، فرسایش رخ می‌دهد، اما می‌تواند پس از سال‌های متمادی نیز ادامه یابد (Martín-Duque et al., 2010). همچنین فرسایش مقیاس محلی

تغییرات در ژئومورفولوژی واکنش به چند عامل پیچیده و متضاد است (Brown et al., 2017). **استخراج معادن و منابع، نواحی شهری و تمامی انواع زیرساخت‌ها، بیانگر حدود ۱۳ درصد از این تغییرات است** (Hooke and Martin-Duque, 2012). **با این حال، معادن مسئولیت بیشتری در تولید رسوب، نسبت به جاده‌های آسفالته و ساخت‌وساز نواحی شهری و کشاورزی دارند**

که در شکلی از تشکیلات سیستم ریلی یا فرسایش ورقه‌ای تسریع‌شده ظاهر می‌شود، اغلب به وسیلهٔ تراکم، پوسته‌پوسته شدن، بافت و ترکیب شیمیایی خاک، کنترل خواهد شد (Nicolau, 2002). تغییر توپوگرافی منطقه‌ای و تجهیز رسوبی متعاقب فرسایش می‌تواند رده‌های زیادی از حجم بزرگ‌تر نسبت به نرخ‌های طبیعی مربوط به آن‌ها را موجب شود (Rivas et al., 2006; Tarolli and Sofia, 2016; Redondo-Vega et al., 2017). نمونه‌های بیشتر تخریب زمین از معدن، مرتبط با زمین‌لغزش‌ها (Esling and Drake, 1988; Haque et al., 2016)، ناپایداری شیب و فرونشست زمین هستند (Meng et al., 2012; Loupasakis et al., 2014; Xu et al., 2014؛ Zhou et al., 2015; Machowski et al., 2016). فعالیت‌های معدنی در نواحی با ویژگی‌های خاص متمرکزند، یعنی مکانی که آن‌ها می‌توانند بی‌ثباتی زمین‌شناسی سریعی به وجود آورند. سقوط سنگ و شکست شیب، بیشترین موارد بحرانی هستند. ناپایداری شیب در فعالیت‌های معدنی بیانگر مسئلهٔ قابل‌توجهی برای صنعت معدن به‌عنوان منبعی بالقوه خطر برای مردم و تجهیزات است. با این حال، با گسترش معادن در مقیاس‌های بزرگ به علت نیازهای مواد معدنی (Nature Geoscience Editorial, 2011, 2015; Vidal et al., 2013)، فاجعه‌های مرتبط با معادن در سطح زمین بیشتر و شدیدتر می‌شود (He et al., 2009). همچنین موجب ایجاد خطر برای چشم‌اندازهای اطراف معادن می‌شود (شکل ۶). در مناطق معدنی گودالی باز، فرونشست زمین می‌تواند به علت تخلیهٔ آب‌های زیرزمینی و کاهش سطح آب، رخ دهد. محدودهٔ فرونشست می‌تواند تقریباً برابر با مساحت معدن باشد؛ مکانی که فشردگی تخریب مجدد چندین بار در محدودهٔ معدن رخ می‌دهد؛ جایی که آبخوان‌ها، آبگیری می‌شوند و تحت تراکم قرار می‌گیرند (Dunrud, 1984).

۴) راه‌ها

در سراسر دههٔ گذشته، به‌ویژه با در نظر گرفتن راه در محیط‌های کوهستانی (i.e., Sidle and Ziegler, 2012)، توجه بسیار زیادی بر پیش‌بینی فرسایش خاک برای لندفرم‌های مهندسی شده اما همچنان در وضعیت کشاورزی (i.e., Tarolli et al., 2015) و دشت‌های سیلابی (i.e., Florsheim et al., 2001) متمرکز شده‌اند. ساخت‌وساز راه در دههٔ اخیر به‌طور چشمگیر در مواجهه با تقاضای افزایش جمعیت انسانی در سراسر جهان گسترش یافته است (Jimenez et al., 2013). این افزایش شبکهٔ راه‌ها باعث گسترش تعاملات فرایندها و راه‌ها و مشکلات جدی فرسایش خاک شد (شکل ۷). شکل خطی راه‌ها و گرایش آن‌ها برای ساختن در سراسر شیب‌های توپوگرافی بر چشم‌انداز در یک مقیاس بزرگ‌تر از آنکه انتظار می‌رود، تأثیر می‌گذارد (Luce and Wemple, 2001). به‌عنوان یک نتیجه، راه‌ها بر نوع فرایندهای ژئومورفیک و هیدرولیک در مقیاس‌های فضایی و زمانی چندگانه اثرگذارند (Reid and Dunne, 1984; Luce and Cundy, 1994; Montgomery, 1994). شبکه‌های حمل‌ونقلی باعث تغییراتی در نیمرخ تپه‌های طبیعی، ایجاد برش جاده، پشته‌های انباشتی می‌شوند و بستر غیرقابل نفوذ راه‌ها بر مسیرهای جریان رسوب و آب به طرق مختلف تأثیر می‌گذارد (Wemple et al., 1996; Jones et al., 2000; Forman et al., 2003). سازه‌های جاده‌ای شیب‌های تند دارند که بازده رسوبی و تولید رواناب را افزایش می‌دهند (Pechenick et al., 2014). همچنین جاده‌ها می‌توانند [باعث] شروع فرسایش خاک از طریق آب انتقالی ساختارهای زهکشی از سطوح غیرقابل نفوذ و علاوه بر آن از پشته‌های برش جاده شوند (Seutloali and Beckedahl, 2015). ساختارهای زهکشی، رواناب را از جریان سطحی پخشی پایین دامنه به جریانی متمرکز تغییر می‌دهند. بنابراین، تمرکز جریانات سطحی زمین می‌تواند گسترش آبراهه‌های کوچک و خندق‌ها، افزایش تراکم زهکشی



شکل ۶: معدن آلومینیم آجکا در غرب مجارستان (A). در اکتبر سال ۲۰۱۰ میلادی، گوشهٔ شمال غربی سد مخزنی معدن فرو ریخت (فلش سفید در شکل)، حدود یک میلیون مترمکعب زباله‌های مایع از دریاچهٔ گلی قرمز، رها شد (B)

حوضه و فشردگی جریان رودخانه را در پی داشته باشد (Montgomery, 1994).

همچنین فرسایش سطحی گسترده ممکن است در جایی رخ دهد که در آن جریان متمرکز در پایین دامنه در نقاط تخلیه قرار دارد. مسیرها و شبکه‌های جاده‌ای می‌توانند پراکندگی چشم‌انداز نقاط شروع و توقف جریان‌های واریزه را تغییر دهند و تعادل بین شدت اوج‌های سیلاب و مقاومت شبکه‌های رودخانه برای تغییر را اصلاح کنند (Jones et al., 2000). مسیرهای جاده‌ای می‌توانند به‌عنوان مکان‌های تولید و نهشته‌گذاری برای حرکات توده‌ای و فرایندهای جریانی عمل کنند و موجب افزایش تولید رسوبی در حوضهٔ آبریز وسیع شوند (Wemple et al., 2001, Sofia and Tarolli, 2016). چنین تولید رسوبی می‌تواند به‌عنوان منابع چندبخشی رسوب از طریق فرسایش سطحی یا در شکل حرکات توده‌ای بزرگ‌مقیاس ظهور کند (Swanson and Dyrness, 1975). با تغییر نرخ و محل فرسایش و رسوب‌گذاری، ممکن است سطوح جاده نفوذ را محدود کند و بر هیدرولوژی و ژئومورفولوژی تأثیر بگذارد و همچنین تأثیر منفی بر کیفیت آب و زیستگاه آبزیان داشته باشد و نرخ تولید رسوبات ریزدانه در حوضه‌های آبریز را افزایش دهد (Reid and Dunne, 1984; Dunne, 1987; Ziegler and Giambelluca, 1997). همچنین ممکن است جاده‌ها بر تولیدات رسوبی و انتقال توسط فرایندهای جریانی تأثیر بگذارند (Wemple and Jones, 2003). علاوه بر این، جاده‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم هندسه آبراهه جریان در عبور رود- جادهٔ مهندسی‌شده را تغییر و کیفیت آب و اکولوژی آبزیان را تحت تأثیر قرار دهند (Luce, 2002). در این نقطه، شبکه‌های جاده‌ای با شبکه‌های جریان در مقیاس چشم‌انداز تعامل دارد و ممکن است آن‌ها بر فرایندهای اکولوژیکی و بیولوژیکی در سیستم‌های ساحلی و رودخانه‌ای، آثاری داشته باشند (Jones et al., 2000). همچنین سیستم‌های حمل‌ونقل، طیف وسیعی از تأثیرات اولیه یا مستقیم زیست‌محیطی و همچنین ثانویه یا غیرمستقیم در چشم‌اندازها را بر هر دوی اجزای آبزی و زیستی اکوسیستم‌های آبزی و خشکی دارند (Coffin, 2007). چالش‌های محیطی ناشی از فرسایش خاک تشدیدی به دلیل آثار اقتصادی جاده‌ها مرتبط با توان‌بخشی خاک و رفتار آب است (Seutloali and Beckedahl, 2015). پس این موضوع مهمی است که درک بهتری از علل چنین فرایندی برای هدایت توسعهٔ آتی همچون تبیین راهنمایی‌های لازم و توصیه‌های آگاهانه در رویکردهای پایشی مؤثر امکان‌پذیر و تلاش‌های کنترلی فرسایش به‌ویژه در محیط‌های کم منابع ارائه شود.

۵) نکات نهایی و چالش‌های باز

فعالیت‌های انسانی نشانه‌های قابل‌توجهی بر زمین با تغییر اکوسیستم‌ها، فرایندها و مورفولوژی آن بر جا گذاشته‌اند. انسان‌ها می‌توانند حجم زیادی از مواد را جابه‌جا کنند و بنابراین به‌عنوان یک عامل زمین‌شناسی، نقش مشابهی حتی در مقیاس‌های زمانی و بزرگای متفاوت ایفا کنند. در اواخر این قرن، به دلیل افزایش جمعیت و نیازهای انسان، ژئومورفولوژی انسانی

شکل ۷: جادهٔ ناشی از زمین‌لغزش (فلش سفید در شکل) در تایوان. همان مکان در سال ۲۰۱۳ میلادی (A) و پس از زمین‌لغزش در سال ۲۰۱۴ (B)

بخش بزرگی از زمین را دربر خواهد گرفت (Tarolli and Sofia, 2016) و پیامدهای فرایندهای سطح زمین (فرسایش خاک و زمین‌لغزش مرتبط با جابه‌جایی جریان آب سطحی به وسیله راه‌ها، فرسایش خاک و حرکات توده‌ای مرتبط با فعالیت‌های معدنی؛ رواناب و فرسایش خاک همراه با تغییرات کاربری اراضی و مسائل مرتبط با سیستم‌های زهکشی آنتروپی در چشم‌اندازهای کشاورزی) چشمگیر خواهد بود. از دیدگاه ژئومورفولوژی، جامعه باید راه‌حلی برای به حداقل رساندن چنین بحران‌هایی پیدا کند. قابلیت ارزیابی آثار توپوگرافی جهانی [اقدامات] انسان با استفاده از [نقشه‌های] توپوگرافی با وضوح بالا که به کمک فنون سنجش از دور جدید (برای مثال اسکنرهای لیزری هوایی) ارائه می‌شوند، یک چالش خواهد بود (Tarolli, 2014). فهرست گسترده‌ای برای ژئومورفولوژیست‌های آنتروپوژنیک وجود دارد که دانشمندان علوم زمین را برای ارزیابی حد تغییر شکل فرایندهای ژئومورفیک در سراسر جهان توسط جوامع انسانی قادر می‌سازد. در نتیجه، این موارد تسهیل خواهند شد: الف) بینش جدید دربارهٔ حساسیت چشم‌اندازها و واکنش آن‌ها به نیروی انسان در مقیاس جهانی؛ ب) توسعه و اجرای استراتژی‌ها و شیوه‌هایی برای کاهش و ملایم کردن تأثیرات اجتماعی و محیطی تغییرات ژئومورفیک آنتروپوژنیک.