بازسازی ژئومورفیک معادن رویکردی نو در ایران

مهوش نداف سنگانی[۱]، سید رضا حسین زاده[۲*]، خوزه فرانسیسکو مارتین داک[۳]، مهناز جهادی طرقی[۴]

[۱]دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران Email: Mahvash.naddaf@yahoo.com

[۲*]دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، **نویسنده مسئول** Email: srhosseinzadeh@um.ac.ir

[۳]دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه کمپلوتنسه مادرید، مادرید، اسپانیا Email: josefcco@ucm.es

[۴]استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران Email: m.jahadi@pnu.ac.ir

چکیده

کشور ایران در میان ۱۵ کشور غنی جهان از نظر تنوع ماده معدنی قرار دارد که در سال‌های اخیر میزان بهم ریختگی چشم اندازها ناشی از فعالیت‌های معدنی در پاسخ به تقاضاهای روز افزون اقتصادی بیشتر شده است. مساله مهم این است که با اینکه در ایران در قوانین معدن، به امربازسازی معادن و تامین مالی آن اشاره شده ولی این چشم اندازهای معدنی پس از استخراج بدون بازسازی به حال خود رها شده است. در این مقاله سعی شده روش بازسازی ژئومورفیک بعنوان یک روش جدیدتر در بازسازی چشم اندازهای مربوط به معادن معرفی گردد. طراحی با این رویکرد در یکی از بزرگترین معادن ایران و خاورمیانه معدن سنگ آهن سنگان خواف توسط نویسندگان انجام شده است. بازسازی ژئومورفیک[۱] یک روش جایگزین روش‌های سنتی برای بازسازی چشم اندازهای ناشی از معدنکاری مطرح می‌شود و اغلب مترادف با ژئومورفولوژی رودخانه‌ای است که اکثراً با استفاده از روش GeoFluv دنبال می‌شود. این رویکرد در سال ۲۰۰۲ توسط بزرگترین شرکت معدنکاری جهان در نیومکزیکو با موفقیت مورد استفاده قرار گرفت و در سال۲۰۰۵ در آمریکا در قالب یک نرم افزار رایانه‌ای جهت طراحی و بازسازی مناطق تحت تأثیر معدنکاری بر اساس اصول علمی رشته ژئومورفولوژی بکار گرفته شد. استفاده از روش بازسازی ژئومورفیک می‌تواند باعث ایجاد یک چشم انداز بصری هماهنگ با محیط اطراف گردد و به مجریان طرح‌ها اجازه می‌دهد که با دقت و سرعت بیشتر و هزینه کمتر طرح‌های مناسب را انتخاب و به اجرا در آورند.

واژه‌های کلیدی: بازسازی ژئومورفیک ، GeoFluv ، معدنکاری، ژئومورفولوژی

۱. geomorphic reclamation or geomorphic restoration or Geomorphic rehabilitation

-مقدمه

معدن‌کاری به عنوان یکی از فعالیت‌های انسانی اثرات زیادی را بر چشم اندازهای اطراف خود برجا می‌گذارد زیرا موجب جابجایی مقادیر زیادی از خاک و سنگ و انباشت مواد باطله بر روی سطح آن می شود. از آنجایی که صنعت معدن تأثیرات قابل توجهی بر چشم اندازهای طبیعی می‌گذارد، اغلب مورد توجه قرار می‌گیرد. تغییرات چشم انداز ناشی از استخراج معادن ، ایجاد و گسترش نواحی شهری و زیرساخت های مربوطه را می توان حدود ۱۳ درصد کل تغییرات محیطی درنظر گرفت ولی فعالیت‌های مربوط به استخراج معادن سهم بیشتری از این درصد را نسبت به فعالیت‌های دیگر بخود اختصاص می‌دهد(هوک[۱]،۱۹۹۹، ص ۶۸۸؛ هوک و مارتین داک[۲]،۲۰۱۲، ص ۵). مخصوصا معادن روباز و سطحی می‌توانند تغییرات زیادی را بر روی شبکه‌های زهکشی طبیعی و بهم خوردن نظم طبیعی آنها، افزایش میزان رواناب و تغییرات توپوگرافیک در مناطق اطراف معدن گردد و فرایندهای ژئومورفیک را تغییر دهند(مارتین و همکاران، ۲۰۱۵، ص ۱۵۰). به عبارت دیگر دستکاری‌های محیطی ناشی از معدن‌کاری می‌تواند منجربه تغییرات توپوگرافیک، تخریب زیستگاه های طبیعی، از بین رفتن تنوع زیستی(گونه‌های گیاهی و جانوری)، فرسایش خاک، آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی (پالمر و همکاران[۳]،۲۰۱۰)، جو و چشم انداز گردیده (نیکولا[۴]، ۲۰۰۳، ص ۲۱۶ ؛ موسا و جیمز[۵]، ۲۰۱۳، ص ۷۵ ؛ مارتین دوکه و همکاران[۶] ۲۰۱۵، ص ۱۲ ؛ طارولی و صوفیا[۷]،۲۰۱۶، ص ۱۴۶) و آثار جانبی نامطلوبی را برای نواحی پایین دست از جمله کاهش کیفیت آب به واسطه انتقال مواد و رسوبات مضر به سیستم های رودخانه‌ای و خاک در پی داشته باشد(مارتین-مورنو و همکاران[۸]، ۲۰۱۶، ص ۱۴۸؛ مکینتایر و همکاران[۹] ۲۰۱۶، ص ۷۷؛ مسینا و بیگز،[۱۰] ۲۰۱۶، ص ۷۲۸؛ زاپیکو وهمکاران،[۱۱]۲۰۱۸، ص ۲۶۷). درمواردی که عملیات معدنکاری در محیط های اکولوژیکی حساس انجام گیرد، لازم است از پایداری فیزیکی و شیمیایی باطله‌های معدنی در حین بهره برداری و پس از اتمام فعالیت معادن اطمینان حاصل شود(هوارد و همکاران[۱۲]،۲۰۱۱، ص). البته این مسائل تا حدودی در قوانین جدید زیست محیطی بسیاری از کشورهای پیشرفته جهان مطرح شده است. به این منظور شرکت‌ها و ارگانهایی که در زمینه معدنی فعالیت می‌کنند ملزم به اجرای طرح‌های مربوط به بازسازی زمین‌های آسیب دیده ناشی از این فعالیت‌ها هستند. از آنجایی که هدف علم ژئومورفولوژی مطالعه میان رشته ای و منظم لندفرم ها و فرآیندهای تغییردهنده سطح زمین است(انجمن ژئومورفولوژی آمریکا ، ۲۰۱۴)، با ظهور قانون کنترل و بازسازی معادن سطحی[۱۳]در سال ۱۹۷۷، تحقیقات ژئومورفولوژیکی در زمینه بازسازی معادن مورد توجه جدی قرار گرفته است زیرا ژئومورفولوژی کاربردی می‌تواند راه کارهای مفید و موثری را برای بازسازی چشم اندازها ارائه دهد که دهه های اخیر به میزان زیادی مورد توجه قرار گرفته و در بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه خصوصا آمریکا،اسپانیا، برزیل و... در حال توسعه است(ریواس و همکاران،[۱۴]۲۰۰۶، ص ۱۹۰؛ هوک و همکاران،[۱۵]۲۰۱۲، ص ۸) که خود تایید کننده نقش مهم ژئومورفولوژی در شناخت و درک ریشه ای مشکلات و کمک به بازسازی و ارائه راه‌حل‌های مدیریتی است. در طی دهه های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰، ادبیات علمی مربوط به ژئومورفولوژی و بازسازی معادن به طور چشمگیری رشد نمود. استیلر و همکاران (۱۹۸۰) نخستین کسانی بودند که توجه محققین را به درک و شناخت اصول ژئومورفولوژی برای بازسازی معادن سطحی و ایجاد پایداری بلند مدت جلب کردند. در این میان مارتین دوکه و همکاران (۲۰۱۰) تجدیدنظر فراگیری در این ادبیات انجام دادند. رویکرد بازسازی

---

۱. Hooke
۲. Hooke and Martin. Duque
۳. Palmer et al
۴. Nicolau
۵. Mossa & James
۶. Martín Duque et al
۷. Tarolli & Sofia
۸. Martín-Moreno & et al
۹. McIntyre & et al
۱۰. Messina Biggs
۱۱. Zapico et al
۱۲. Howard et al
۱۳. Surface Mine Control and Reclamation Act
۱۴. Rivas et al
۱۵. Hooke et al

ژئومورفیک[1](GeoFluv) اولین بار پس از استفاده موفقیت آمیز در بازسازی چشم اندازهای مربوط به معادن زغال سنگ نیومکزیکو در سال ۱۹۹۹ به رسمیت شناخته شد (بوگوش،۲۰۰۰، ص ۲۰) و تقریبا از حدود سال ۲۰۰۰ در طراحی و بازسازی لندفرم ها در در بسیاری از سایت های معدنکاری شده غرب ایالات متحده، استرالیا (بوگوش و اپپ[2]،۲۰۱۹، ص ۳۸۴؛ کلدر و همکاران[3] ۲۰۱۶، ص ۱۰۳؛ وایگوگ[4]،۲۰۱۴، ص ۱۰۰)، قسمت‌های شرقی ایالات متحده(دپریست و همکاران[5] ۲۰۱۵، ص ۲۵) و آمریکای جنوبی(بوگوش و همکاران، ۲۰۱۹، ص ۳۸۵)مورد استفاده قرار گرفت. این روش درسال ۲۰۰۹ برای اولین بار در اسپانیا نیز مورد استفاده قرار گرفت. اولین پروژه LIFE[6] اتحادیه اروپا تحت عنوان پروژه ECOREST CLAY توسط شرکت سیمکس[7]با استفاده از این روش برای طراحی و بازسازی ژئومورفیک سایت های معدنکاری خاک رس مورد استفاده قرار گرفت. دومین پروژه اتحادیه اروپا تحت عنوان پروژه تک ماین[8]پروژه زیست محیطی مبتنی بر بازسازی ژئومورفیک در استان والنسیا، در محدوده رشته کوه آیبری) دو معدن شن و ماسه سیلیسی و رس متعلق به شرکت معدنی سایبلکو[9] در اسپانیا بود(مارتین مورنو و همکاران، ۲۰۱۶، ص ۱۵۰). شرکت ذغال سنگ سان خوان[10] با بهره گیری از روش بازسازی ژئومورفیک از سال ۱۹۹۹ تا سال ۲۰۰۸ ، ۷۴۳ هکتار از معدن لاپلاتا[11]را ساماندهی کرد(بوگوش،۲۰۰۰). نمونه بعدی معدن زغال سنگ مانگولا[12] (گلنکور)[13]در دره هانتر[14]در نیو ساوت ولز[15]استرالیا است که به دلیل طراحی درست و پایدار لندفرم ها با استفاده از رویکرد بازسازی ژئومورفیک شناخته شده است. از آغاز به کار این معدن در سال ۲۰۱۱، برنامه ریزان و مدیران معدن مانگولا مصمم بودند که یک رویکرد مناسب را برای بازسازی اراضی معدنی اتخاذ کنند. لذا آنها از متخصصان خارجی کمک گرفتند تا بتوانند با استفاده از رویکرد ژئومورفولوژی رودخانه‌ای چشم انداز مناسب را برای بازسازی پس از معدنکاری طراحی کنند. در نتیجه از زمان اجرای این روش، فرسایش شیاری، در اطراف معدن مانگولا به میزان قابل توجهی کاهش یافت و پوشش گیاهی بومی و زیستگاههای مناسب در تطابق با چشم اندازهای اطراف ایجاد و توسعه پیدا کرد. با توجه به موفقیت این روش در بازسازی لندفرم های طبیعی نواحی اطراف معدن، این روش در سایر مکان های معدنی استرالیا نیز مورد استفاده قرار گرفت. کنفرانس ایمنی و بهداشت محیط زیست معدنی نیو ساوت ولز در سال ۲۰۱۵، معدن مانگولا را در طبقه بندی عالی محیطی در زمینه "طراحی مناسب لندفرم برای بازسازی معادن " به رسمیت شناخت(هنکوک و همکاران، ۲۰۱۹، ص۱۴۳). نمونه بعدی تغییرات زمین در محل معدن کائولین نوریا[16]در پارک آلتاجو اسپانیا که حوضه آبریز طبیعی آن را به میزان ۵۰٪ دگرگون و تخریب نموده، باعث تغییرات شدید محیطی، تشدید فرسایش و وقوع زمین لغزش گردید. از این رو برای پایدارسازی نواحی دچار زمین لغزش در این حوضه از رویکرد بازسازی ژئومورفیک استفاده قرار شد(زاپیکو همکاران[17]،۲۰۲۱). در ایران اکثر کارهایی که در زمینه بازسازی معادن انجام شده است بازسازی بیولوژیکی می باشد که برای نمونه به چند مورد اشاره می کنیم: انتخاب روش مناسب بازسازی معادن روباز با رویکرد بهره گیری از انرژی های تجدید پذیردر معادن سنگان نتیجه نشان داد که احداث مزرعه بادی به عنوان گزینه ای مناسب برای بازسازی زمین های استخراج شده با توجه به پتانسیل باد خیزی منطقه گزینه ای مطلوب است (مظفری و همکاران،۱۳۹۴، ص ۶۵). در پژوهشی دیگر تاثیر فعالیت های معدنکاری را بر ژئومورفولوژی از دیدگاه زیست محیطی درمعادن شن و ماسه تنگل شور جنوب شرق شهر مشهد نتیجه حاصل شد که عملیات معدنکاری در مقیاس وسیع شامل خاکبرداری، خاکریزی، حفر گودال، تیغ زنی دیواره ها و انفجار و برداشت بی رویه سبب بروز تنش در منطقه شده و شکل اولیه سطح زمین دچار تغییرات زیادی در توپوگرافی و شکل الگوی زمین شده است(شیبانی و همکاران،۱۳۹۴، ص ۷۶). در پژوهشی اولویت دهی معیارهای بازسازی در خاتمهٔ فعالیت معادن در معادن سنگ آهن گل گهر سیرجان، سنگان و چادرملو ۴۰معیاری بازسازی را از روش تصمیم گیری چندمعیارهٔ دلفی فازی با توجه به امتیازهای اختصاص داده شده به هر معیار و مقایسهٔ فازی آن ها، ۱۶ زیرمعیار که دارای بالاترین اولویت در بازسازی معادن بودند، انتخاب شدند. از میان معیارهای

---

۱. Geomorphology Fluvial
۲. Bugosh & Epp
۳. Kelder et al.
۴. Waygood
۵. DePriest et al
۶. L’Instrument Financier pour l’Environnement
۷. Cemex
۸. TECMINE
۹. SIBELCO
۱۰. San Juan
۱۱. La Plata
۱۲. Mangoola
۱۳. Glencore
۱۴. Hunter
۱۵. New South Wales
۱۶. Nuria
۱۷. Zapico et al

اولویت دهی شده، شیب و وسعت محدودهٔ تخریب شده دارای بالاترین و روش کاشت و ارزش دارویی گیاهان دارای پایین ترین اولویت بودند(حاج کاظمیها و همکاران،۱۳۹۳،ص ۱۲۳).

۳- رویکرد بازسازی ژئومورفیک

طراحی و بازسازی لندفرم های طبیعی در مکانهای معدنکاری شده به روش سنتی و روش های ژئومورفیک صورت می‌گیرد. روش‌های سنتی برای بازسازی زمین برای رسیدگی به اهداف معدن (به حداقل رساندن فواصل حمل و نقل، بهینه سازی حرکت زمین، و به حداقل رساندن تأثیر بر زمین های اطراف)، اهداف نظارتی (از جمله رعایت استانداردهای زیست محیطی) و انتظارات جامعه برای استفاده از زمین پس از اتمام عملیات معدنکاری انجام می‌شده است. در این روش بازسازی توپوگرافی چشم اندازها به صورت احداث سیستم های تراس بندی، ایجاد دامنه هایی با شیب یکنواخت و زهکشی شیاری با هدف به حداکثر رساندن حجم ذخیره سازی مواد، انتقال آب به نواحی دورتر از مناطق تخریب شده و دستیابی به ثبات ژئوتکنیکی برای باطله‌های معدنی(فنگ و همکاران[۱]،۲۰۱۹، ص ۱۴)، و همچنین روش بیولوژیکی(شکل۲) می‌باشد. اما مطالعات انجام شده در طی چند دهه گذشته در مورد فرسایش باطله های معدنی نشان می دهد که شیوه های بازسازی سنتی ثبات طولانی مدت باطله های معدنی را تضمین نمی کند و پایدار نیستند(مارتین داک و همکاران،۲۰۱۵، ص ۲۴۵) به طوری که بدون تعمیر و نگهداری مداوم (که معمولاً از نظر اقتصادی هم امکان‌پذیر نیست) بیشتر لندفرم‌های بازسازی شده معدنی با این روش‌ها به تدریج دچار فرسایش و تغییر می‌گردند و کنترل مؤثر فرسایش و رسوب در مناطق معدنی بازسازی شده و محیط اطراف آنها نیازمند مدیریت یکپارچه باطله های معدنی، آب، توپوگرافی، پوشش سطحی و خاک است. در این نوع بازسازی ها حتی دامنه‌های با شیب یکنواخت و منظم(شکل۳) نیز به دلیل نبود زهکشی مناسب ناپایدار هستند. مطالعه ۵۷ معدن بازسازی شده در آمریکای شمالی نشان داد که طراحی ناقص شبکه‌زهکشی(مک کنا و داوسون[۲]،۱۹۹۷، ص ۷۶)، تغییرات سطح اساس و توسعه فرسایش شیاری(هایق، ۱۹۸۵، ص ۶۰) از دلایل عدم موفقیت روش‌های بازسازی سنتی می‌باشد. این روش‌ها حتی در شرایط شکل‌گیری جریان هایی با شدت کم هم نمی تواند تعادل هیدرولوژیکی محیط را حفظ کند که این خود باعث عدم موفقیت در زمینه بازسازی پوشش گیاهی، دام و حیات وحش پس از تغییرات ایجاد شده در کاربری اراضی می‌گردد و بر هزینه‌های نگهداری و عوارض ناشی از آن می افزاید. به عنوان مثال تراس ها و خندق های ایجاد شده برای انتقال جریان های شدید و رسوبی در زمان وقوع جریان های با شدت کم هم مسدود شده و باعث شکل‌گیری حوادث کاتاستروفیک می‌شوند(بوگوش[۳]، ۲۰۰۰). اگرچه رویکرد های سنتی(شکل۱) در باطله‌ها برای اهداف کوتاه‌مدت معدن در بهینه‌سازی حرکت زمین و کاهش هزینه‌ها و الزامات قانونی محلی برای زاویه شیب و پایداری را برآورده می‌کنند، اما میراث بلندمدت آنها می‌تواند پرهزینه باشد.

۱. Feng et al
۲. McKenna & Dawson
۳. Bugosh

شکل(۱): نمونه ای از بازسازی باطله ها با رویکرد سنتی(تراس بندی)(اسپانیا)

شکل۲- نمونه ای بازسازی های سنتی بیولوژیکی(معدن سنگ آهن سنگان خواف)

شکل ۳-بازسازی سنتی شیب های تند با شیب بندی یکنواخت و نبود زهکشی(معدن سنگ آهن سنگان)

بیشتر عدم موفقیت‌های بازسازی سنتی چشم اندازها و سازه های مرتبط پس از معدنکاری به دلیل فرسایش است(مارتین داک و همکاران[۱]، ۲۰۱۵، ص ۱۳) و در ادغام هیدرولوژیکی، اکولوژیکی و بصری لندفرم های بازسازی شده پس از معدنکاری به روش سنتی، زمین های اطراف تا حد زیادی نادیده گرفته شده است و بهتر است که بازسازی با چشم انداز اطراف ترکیب و ادغام شود. تقاضا برای معرفی اصول ژئومورفولوژی در بازسازی معادن در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ در ایالات متحده و استرالیا توسعه یافت. نیکلاس بوگوش یکی از هیدرولوژیست

[۱] Martín Duque et al.

های آمریکایی متوجه شد که روش‌های سنتی بازسازی معادن پرهزینه بوده و نیاز به نگهداری طولانی‌مدت دارد. به منظور پرداختن به این مسائل، بوگوش رویکرد "بازسازی ژئومورفیک" را برای طراحی لندفرم توسعه داد. او با به کارگیری اصول ژئومورفولوژی رودخانه ای و درک ویژگی های جریان آب در شرایط مختلف، این رویکرد را برای بازسازی توسعه داد. فرض بوگوش این بود که اگر بتوان چشم اندازها را به همان شکلی طبیعت ساخت، خودپایدار و کاربردی خواهند بود. در ابتدا مفهوم خطوط تراز اصلی[۱]مطرح بود که در قانون کنترل و احیای معدن سطحی ایالات متحده[۲](۱۹۷۷) گنجانده شده است. به این معنی که هر گونه بازسازی معدن در ایالات متحده باید«شباهت بسیار زیادی به پیکربندی عمومی سطح زمین قبل از معدنکاری داشته باشد و با الگوی زهکشی زمین های اطراف تطابق داشته و مکمل آن باشد». تقاضا برای تکمیل الگوی زهکشی زمین های اطراف، "رویکرد حوضه آبریز" در بازسازی معادن را معرفی کرد یعنی از حوضه زهکشی به عنوان یک واحد اساسی برای برنامه ریزی بازسازی معدن استفاده شود. اساساً، هدف تکرار الگوهایی بود که لندفرم‌ها در حوضه‌های آبریز طبیعی دارند، موضوعی که به طور گسترده توسط ژئومورفولوژی رودخانه ای برای حدود ۱۵۰ سال مورد مطالعه قرار گرفته است. اگرچه ایده شبیه سازی لندفرم های طبیعی در سایت های معدنکاری شده دارای طرفداران و دست اندرکاران بسیاری در سایه رویکرد چشم انداز سازی بوده است، باید گفت که تنها چند روش علمی استاندارد شده و شناخته شده با رویکرد واقعاً ژئومورفیک برای بازسازی توپوگرافی وجود دارد. به عنوان مثال روش تالوس رویال[۳]با موفقیت در برش های جاده‌ای سنگی در فرانسه به کار گرفته شده است(ژنی ژئولوژیکو[۴]،۲۰۱۷، ص ۱۲۳)(شکل۴). در این روش سعی می‌شود وضعیت طبیعی سنگ های دامنه را با ریزش هایی که در سنگهای فرسوده یا شکسته رخ می دهد در طول زمان مورد بررسی قرار داد. این تکنیک با طراحی و ساختن دامنه‌های سنگی که تمایل به تشکیل و تکامل در زمان را دارند از طریق ریزش‌ها و لغزش‌هایی که ترجیحاً روی سنگ‌های هوازده یا شکستن سنگ با انفجار رخ می‌دهند، زمان را فشرده می‌کند. روش روزگن[۵](۱۹۹۶) به طور گسترده برای بازسازی آبراهه های دائمی در ایالات متحده در تعداد زیادی از سایت های معدنی مورد استفاده قرار گرفته است. طبقه بندی مورفولوژیکی روزگن از رودخانه ها بر اساس شیب، نسبت عرض به عمق، مواد بستر و سینوسی بودن بستر صورت گرفته و به عنوان یک روش بازسازی ژئومورفیکی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. ریور مورف[۶](۲۰۱۹) نرم افزاری طراحی شده بر اساس اصول روش روزگن می باشد.

شکل۴- نمونه ای از روش بازسازی تالوس رویال

۱. Approximate Original Contour
۲. Surface Mining Control and Reclamation Act
۳. Talus Royal
٤. Génie Géologique
٥. Rosgen
٦. RIVER Morph

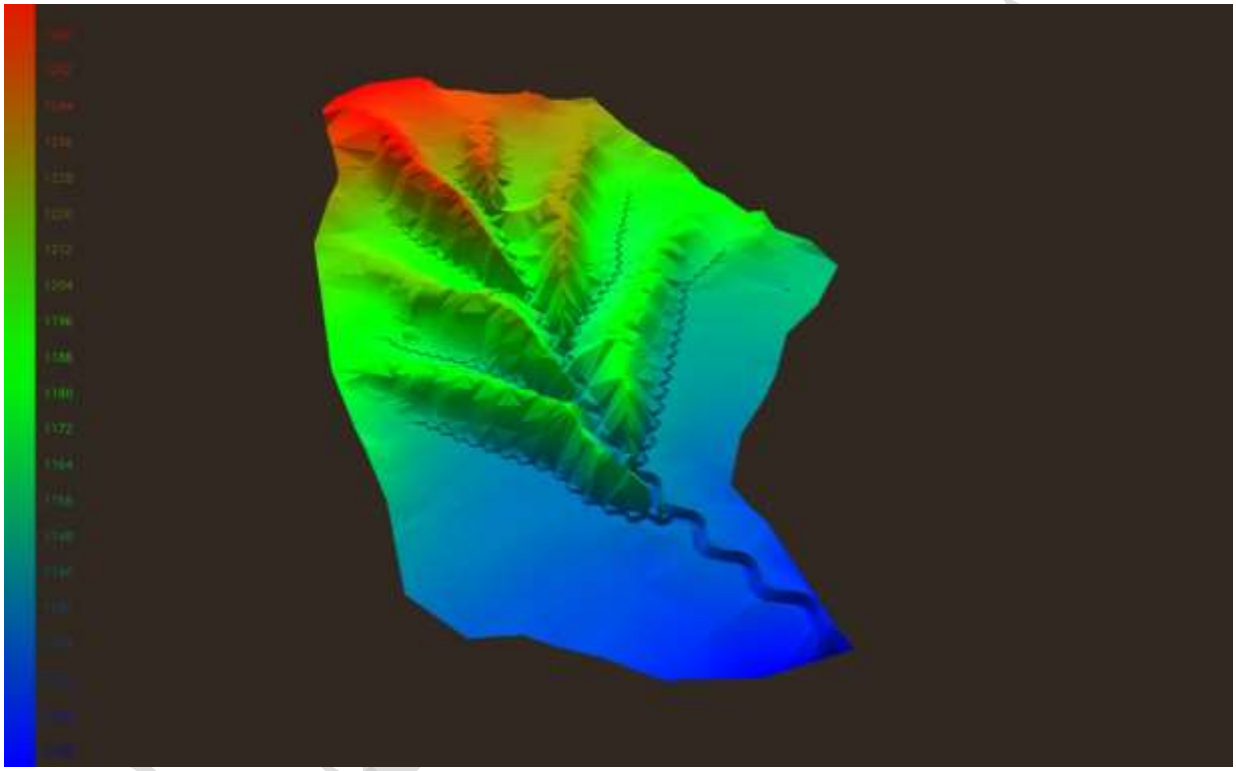
به روزرسانی ها و اجرای این مفاهیم بستر مناسبی برای روش بازسازی ژئومورفیک با استفاده از GeoFluv بود.GeoFluv نام علامت تجاری یک روش خاص و ثبت شده برای طراحی لندفرم است که از الگوریتمی بر اساس اصول ژئومورفولوژی رودخانه ای استفاده می کند. این رویکرد بعداً توسط استیلر و همکاران به صراحت بیان شد(بوگوش،۲۰۰۰)، آنها اظهار داشتند که برنامه ریزی برای پایداری بلند مدت معادن سطحی بازسازی شده به معنای ادغام شبکه های زهکشی با چشم انداز اطراف است. در واقع رویکرد بازسازی ژئومورفیک، تجزیه و تحلیل های مهندسی هیدرولوژیکی را با ابزارهای طراحی ژئومورفیک برای تثبیت و بازسازی قابل توجه چشم انداز تغییر یافته ترکیب می‌کند که امروزه با توسعه نرم افزارهای ژئومورفیک امکان پذیر شده است. در این روش برای ایجاد لندفرم‌های پایدار از معیارهای ژئومورفیک نواحی دست نخورده اطراف آن که متناسب با وضعیت توپوگرافی، جنس سنگ، ویژگی های خاک و آب و هوای آن محدوده در یک مدت زمان شکل گرفته است، استفاده می‌شود. به عبارتی رویکرد بازسازی ژئومورفیک از ویژگی‌های کمی لندفرم‌های طبیعی پایدار مجاورت زمینهای معدنکاری شده به‌عنوان معیار طراحی برای بازسازی استفاده می‌کند. هدف ایجاد یک منطقه بازسازی شده طبیعی و دارای پوشش گیاهی متنوعی در تطابق با این نواحی می باشد که می تواند منجر به ایجاد یک پایداری دینامیکی شده و به لندفرم های طبیعی اجازه دهد حتی روان اب‌های ناشی از وقایع ناگهانی و بزرگ را تحت کنترل در آورد. برای دست یابی به این هدف، بایستی یک منطقه مرجع مناسب و پایدار (بالغ) مورد شناسایی قرار گیرد تا اطلاعات اولیه برای طراحی بازسازی فراهم گردد. مقادیر پارامترهای ورودی طراحی در پاسخ به تنوع محیطی محلی تغییر می کند و باید در لندفرم های پایدار محلی شناسایی شود. برای این منظور ما نیازمند اندازه گیری چندین پارامتر مورفومتریک از یک حوضه زهکشی هستیم که از نظر ویژگی‌های آب و هوایی، توپوگرافی، جنس خاک و پوشش گیاهی و... دارای مشابهت بیشتری با منطقه مورد بازسازی باشد. این پارامترهای مورفومتریک شامل ارتفاع سطح اساس محلی، تراکم زهکشی، طول مستقیم جریان در کانال های با شیب بیشتر از ۴٪ ، فاصله خط الراس تا ابتدای کانال، شاخص سینوزیته، عرض و عمق کانال و... است. این موارد باید به صورت دقیق مورد اندازه گیری قرار گرفته و به عنوان ورودی‌های اصلی مربوط به طراحهای بازسازی سایت مورد استفاده قرارگیرد. مقادیر مربوط به هریک از این پارامترها در هر مکانی متفاوت بوده و نمی تواند به طور عام مورد استفاده قرار گیرد. این ورودی‌ها به رویکرد بازسازی ژئومورفیک اجازه می‌دهند تا چشم اندازی با تعداد لازم کانال با پروفیل‌های طولی و عرضی مناسب طراحی کنند تا آب را به طور طبیعی تخلیه کند. علاوه بر این پارامترهای محلی، این رویکرد به اطلاعاتی در مورد ارتفاع پایه زهکشی محلی، شیب کانال در آن نقطه و همچنین برخی اطلاعات در مورد بارندگی محلی و رویدادهای رواناب نیاز دارد. فرآیند طراحی بازسازی ژئومورفیک شامل: تعیین مناطق مرجع و اندازه گیری پارامترهای اقلیمی، توپوگرافی،خاکشناسی، پوشش گیاهی آن که دارای مشابهت زیادی با ویژگی های سایت معدنکاری داشته باشد(جدول۱). گرفتن خروجی تحت عنوان طرح بازسازی ژئومورفیک و بررسی آن به منظور اطمینان یافتن از اینکه طراحی پیشنهاد شده متناسب با ویژگی های سایت بوده و عملکرد صحیحی را ارائه می‌دهد یا نه؟

جدول ۱- ورودی های مورد استفاده برای بازسازی ژئومورفیک

	منبع
-شرایط توپوگرافی منطقه طراحی: - ارتفاع سطح اساس - شیب سطح اساس	-مدل رقومی ارتفاع
-ورودی های مورفومتریک از یک منطقه مرجع پایدار - بازه کانال نوع " A "(کانال با شیب بیشتر از ٪۰،۰۴؛ طبقه بندی روزگن) - حداکثر فاصله از خط الراس تا ابتدای کانال -تراکم زهکشی هدف	-کار میدانی -ابزار سنجش از دور -تجزیه و تحلیل GIS از منطقه مرجع

در سالهای اخیر استفاده از روش بازسازی ژئومورفیک معادن مختلف در دنیا در حال گسترش است از جمله در ایران در معدن سنگ آهن سنگان توسط نویسندگان این مقاله طراحی انجام شده است(شکل۵) و همچنین در کشورهای مختلف طرح های متعددی در این رابطه پیشنهاد شده

است(زاپیکو و همکاران، ۲۰۱۸، ص ۱۰۳). دستاورد های موفق پروژه های بازسازی ژئومورفیک باعث شد که این روش بازسازی ژئومورفیک در سال ۲۰۱۸ توسط کمیسیون اروپا[1] اتحادیه اروپا[2] به عنوان یکی از بهترین تکنیک های در دسترس[3]، در تطابق با بخشنامه اروپایی ۲۱/۲۰۰۶ EC/ برای مدیریت باطه های صنایع استخراجی شناخته شود و جوایزی در این زمینه در نظر گرفته شده است. از آن زمان به بعد این رویکرد در کشور های مختلف با طیف گسترده ای از نمونه های بازسازی ژئومورفیک برای معادن مختلف ، پذیرش عمومی پیدا کرد که در اینجا به تعدادی از آنها اشاره می شود، شکل شماره(۶) تصاویری از بازسازی مبتنی بر ژئومورفولوژی در معدن کائولین فعال ال ماچورو[4] در اسپانیا را نشان می دهد. طراحی و عملکرد محیطی مناسب ناشی از استفاده از این روش در بازسازی ژئومورفیک معدن ال ماچورو باعث گردید از سال ۲۰۱۲ به عنوان یک روشی نو و مترقی در معادن کوهستانی اروپا مورد توجه قرار گیرد. لازم به ذکر است که در حال حاضر مناطق اطراف معدن ال ماچورو از نظر ژئومورفیک در شرایط پایداری قرار دارد و نیازمند صرف هزینه های نگهداری نیست.



شکل۵- نمونه ای از طراحی های بازسازی ژئومورفیک ارائه شده در معدن سنگ آهن سنگان خواف، ایران(نگارندگان)

۱European Commission
۲ European Union
۳Best Available Techniques
٤ El Machorro kaolin mine

شکل ۶- مراحل بازسازی ژئومورفیک بخشی از معدن کائولین ال ماچورو (پوودا د لا سیرا، گوادالاخارا، اسپانیا). سمت راست بالا: قبل از بازسازی(اوت ۲۰۱۲)؛ شکل چپ بالا: پس از تغییر شکل زمین (اکتبر ۲۰۱۲)؛ شکل پایین: مراحل ابتدایی استقرار مجدد پوشش گیاهی (مه ۲۰۱۴).

نمونه دیگر مربوط به معدن سنگ متروکه سومولینوس[۱]استان گوادالاجارا دراسپانیا است که با استفاده از روش GeoFluv به اجرا در آمده است. این معدن قبلاً در سال ۲۰۰۸ با روش سنتی- پلکانی (با استخرهای رسوبی ایجاد شده روی آنها) مورد بازسازی قرار گرفته بود که بعدها درختان و درختچه هایی که جهت کنترل فرسایش روی این سطوح پلکانی کاشته شده بود بدلیل عدم انجام اقدامات مراقبتی توسط ماسه ها مورد تخریب قرار گرفتند. بطوریکه در سال۲۰۱۱ این سطوح پلکانی و دامنه های تند بین آنها دچار فرسایش شدیدی شده، استخرهای ایجاد شده عمدتاً از رسوبات انباشته شدند و پوشش گیاهی ایجاد شده به منظور کنترل فرسایش، کاملاً بی فایده شدند. علاوه بر آن، پس از وقوع بارش های شدید، رواناب‌های شکل می‌گرفتند که رسوبات معلق زیادی را بطرف نواحی پایین دست حمل می‌کردند. بنابراین رویکرد بازسازی ژئومورفیک به دلایلی چون بهبود شرایط زیست محیطی، بهبود کیفیت آب های سطحی، به حداقل رساندن فرسایش خاک، بهبود مورفولوژی و شکل کانال جهت انتقال آب، کنترل میزان تخلیه رسوب، بهبود پوشش گیاهی و ارزش های زیستگاهی (نسبت به شرایط قبل از بازسازی) به عنوان بهترین روش بازسازی شناخته شد(شکل۷)

۱. Somolinos

شکل ۷- مقایسه عکس های هوایی معدن سومولینوس از آوریل ۲۰۱۱ (قبل از بازسازی) تا می ۲۰۲۰. منبع: نول(سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴)، دیوید گوته رز[۲](سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰) و جاویر مله رو[۳](سال ۲۰۱۹).

به طور خلاصه می‌توان مزیت های رویکرد بازسازی ژئومورفیک رودخانه ای را به شرح زیر خلاصه نمود:

-مزایای اقتصادی

- کاهش هزینه نگهداری سطوح بازسازی شده به دلیل عدم نیاز به احداث سازه‌های مصنوعی در مقایسه با روش های بازسازی سنتی

-مزایای اجتماعی

به حداکثر رساندن امکان استفاده از اراضی بازسازی شده(جنگلی ، مرتع ، کشاورزی ، تفریحی و حتی شهری).

-مزایای زیست محیطی

پایدار سازی پیت های معدنی(چاله های به جا مانده از استخراج معدن) و ایجاد کانال‌ها و دامنه‌هایی که در وضعیت متعادل و هماهنگ با مناطق اطراف خود هستند که می‌تواند باعث کاهش خطرات نامطلوب زیست محیطی گردد.

- برقراری تعادل طبیعی بین آب و رسوب
- ایجاد تنوع توپوگرافیک و در نتیجه افزایش تنوع زیست محیطی(رشد و نمو گیاهان طبیعی و جانوران بومی).
- نفوذ بیشتر آب به داخل زمین و تامین آب در دسترس گیاهان .

در جدول شماره (۲) تفاوت‌های بارز بین روش‌های سنتی و روش های مبتنی بر پارامترهای مورفومتریک(ژئومورفولوژی رودخانه ای) نشان داده شده است.

۱. Paisajes Espa˜noles
۲. David Guti´errez
۳. Javier Melero

جدول ۲- مقایسه روش های بازسازی سنتی و GeoFluv

روش سنتی	GeoFluv™
براساس دبی لحظه‌ای	براساس کلیه دبی های وقوع یافته
به دلیل نیازمندی به مواد خارج از سایت برای احداث نیازمند صرف هزینه بیشتری است(به عنوان مثال احداث سنگ چین)	به دلیل استفاده از مواد داخل و اطراف سایت هزینه کمتری ایجاد می کند.
هزینه بیشتری در شیبهای تندتر تحمیل می کند.	به دلیل عدم نیاز به احداث تراس بندی در دامنه‌های پرشیب، هزینه‌ها به طور قابل توجهی کاهش می یابد.
به نگهداری طولانی مدت احتیاج دارد	خود نگهدار است
حداقل تنوع را در جهت شیب ایجاد می کند	افزایش تنوع در جهات شیب دامنه‌ها که باعث ارتقا و تنوع زیستگاه‌های پوشش گیاهی و جانوری می‌شود.
ناهماهنگی بصری بیشتری ایجاد می‌کند.	زیبایی طبیعی ایجاد می کند.
انعطاف پذیری کمتری در ایجاد چشم اندازهای جایگزین دیده می‌شود.	طرح های متفاوت و متعدد برای یک چشم انداز ارائه می‌دهد.
نهادهای نظارتی رضایت ندارند.	نهاد های نظارتی رضایت دارند.

۴-نتیجه گیری

از آنجایی که علم ژئومورفولوژی به بررسی لندفرم‌ها و فرآیندهای سطحی می‌پردازد چارچوبی مفید را برای درک اثرات معدنکاری فراهم ساخته و مناسب ترین راهکارها را برای بازسازی آنها ارائه می‌دهد. در ژئومورفولوژی برای بازسازی چشم اندازهای ناشی از معدنکاری و به منظور دستیابی به پایداری طولانی مدت در برابر فرسایش، کاهش نیاز به نگهداری و هزینه های آن و افزایش تنوع زیستی از رویکرد بازسازی ژئومورفیک(GeoFluv™) استفاده می‌کند. به رسمیت شناختن روش بازسازی ژئومورفیک به عنوان یک روش برتر در چندین پروژه در اسپانیا موید این است که این روش را می‌توان به عنوان یک روش جایگزین روش‌ها سنتی برای بازسازی چشم اندازهای به شدت دستکاری شده ناشی از معدنکاری در نقاط مختلف دنیا از جمله کشور ما در نظر گرفت. سایت های معدنی بازسازی شده با استفاده از این تکنیک به سیستم های حوضه آبریز کاربردی تبدیل می شوند. در این رویکرد مقادیر پارامترهای ورودی متناسب با ویژگی‌ها و پارامترهای مربوط به لندفرم‌های پایدار محلی انتخاب می‌شود. به عبارت دیگر هدف از بازسازی ژئومورفیک "ساخت چشم اندازهایی متناسب با شرایط محیط طبیعی" است که بر اساس اصول و معیارهای علمی ژئومورفولوژیک و هیدرولوژیک مورد استفاده قرار گرفته و از نظر اقتصادی می‌تواند بسیار سودآور باشد. الگوهای زهکشی اراضی دست نخورده مجدد تولید می شود. به جای تراسهای یکنواخت و شیب های خطی که در نتیجه معدنکاری یافت می شود، لندفرم های ژئومورفیکی دارای خط الراس ها، دره ها و دامنه های محدب و مقعر طراحی می شوند. توپوگرافی متنوع لندفرم منجر به ایجاد پوشش گیاهی متنوع، بهبود زیبایی‌شناسی و ارزش زیستگاه مناطق بازسازی شده می‌شود. استفاده از روش بازسازی ژئومورفیک می‌تواند باعث ایجاد یک چشم انداز بصری هماهنگ با محیط اطراف گردد. همچنین این روش به ایجاد نقشه‌های توپوگرافیک و تصاویر سه بعدی مربوط به طراحی چشم اندازها کمک کرده و به مجریان طرح‌ها اجازه می‌دهد که با دقت و سرعت بیشتر و هزینه کمتر طرح‌های مناسب را انتخاب و به اجرا در آورند.

۵-منابع

- حاج کاظمیها نرگس، محمود شریعت ، مسعود منوری ، محمد عطایی(۱۳۹۳) **اولویت دهی معیارهای بازسازی در خاتمهٔ فعالیت معادن(مطالعهٔ موردی: معادن سنگ آهن گل گهر، سنگان و چادرملو)**، محیط شناسی، دورهٔ ۴۰ ، شمارهٔ ۴.
- شیبانی یحیی, لادن؛ سعید سعادت و علی اصغر آریایی،(۱۳۹۴)، **تاثیر فعالیت های معدن کاری بر ژئومورفولوژی از دیدگاه زیست محیطی**، دومین کنگره بین المللی زمین شناسی کاربردی، مشهد، گروه زمین شناسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد.
- مظفری،علی و امیر حسین بانگیان(۱۳۹۴)، **انتخاب روش مناسب بازسازی معادن با رویکرد بهره گیری از انرژی های تجدید پذیر(مطالعه موردی معدن سنگان)**، سومین کنفرانس معادن روباز ایران.

– Bugosh, N & Epp, E (2019). 'Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic reclamation watersheds at La Plata Mine', *Catena*, vol. 174, pp. 383–398.
– Bugosh, N. (2000). 'Fluvial geomorphic principles applied to mined land reclamation'. OSM Alternatives to Gradient Terraces Workshop, January 2000. Office of Surface Mining, Farmington.

- Bugosh, N. (2003). 'Innovative Reclamation Techniques at San Juan Coal Company (or why we are doing our reclamation differently)', July Rocky Mountain Coal Mining Institute National Meeting, Copper Mt., Colorado.
- Bugosh, N., (2000). Fluvial geomorphic principles applied to mined land reclamation. OSM Alternatives to Gradient Terraces Workshop, January 2000. Office of Surface Mining: Farmington, NM, United States
- DePriest, NC, Hopkinson, LC, Quaranta, JD, Michael, PR & Ziemkiewicz, PF (2015), 'Geomorphic landform design alternatives for an existing valley fill in central Appalachia, USA: quantifying the key issues', *Ecological Engineering*, vol. 81, pp. 19–29.
- Feng, Y., Wang, J., Bai, Z., & Reading, L. (2019). Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. Earth-Science Reviews, 191, 12-25.
- Génie Géologique, 2017. The Talus Royal Method Website. http://www.2g.fr/, Accessed date: 22 October 2017.
- Gagen, P. J., & Gunn, J. O. H. N. (1988). A geomorphological approach to limestone quarry restoration. Geomorphology in environmental planning, 121-142.
- Hancock, G. R., Duque, J. M., & Willgoose, G. R. (2019). Geomorphic design and modelling at catchment scale for best mine rehabilitation–The Drayton mine example (New South Wales, Australia). Environmental modelling & software, 114, 140-151.
- Haigh MJ. (1980). Slope retreat and gullying on revegetated surface mine dumps, Waun Hoscyn, Gwent. Earth Surface Processes 5(1): ٧٧–٧٩. ٠٠١:١ ٠,١ ٠٠٢/□□□.٣٧٦٠٠٥٠١ ٠٨.
- Haigh, M.J., (1985). The experimental examination of hill-slope evolution and the reclamation of land disturbed by coal mining. In: Johnson, J.H. (Ed.), Geography Applied to Practical Problems. Geo Books, Norwich, pp. 123–138.
- Hooke, R. L., & Duque, J. F. M. (2021). Impact of the Great Acceleration on Our Life-Support Systems.
- Hooke R, Martىn-Duque J, Pedraza J (2012) Land transformation by humans: a review. GSA Today ٢٢(١٢):٤□١٠
- Hooke, R. L. (2000). On the history of humans as geomorphic agents. *Geology*, *28*(9), 843-846.
- Hooke R (1999) Spatial distribution of human geomorphic activity in the United States: comparison with rivers. Earth Surf Proc Land 24:687–692
- Howard, E, Loch, R & Vacher, CA(2011), 'Evolution of landform design concepts', Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, vol., 120, no. 2, pp 112–117.
- IAG 2014. Web site of the International Association of Geomorphologists, IAG. http://www.
- geomorph.org/Accessed April 19, 2014.
- Kelder, I, Willis, T & Waygood CG, (2016), 'Integrating the use of natural analogues and erosion modelling in landform design for closure', in AB Fourie & M Tibbett (eds), Proceedings of the 11th International Conference on Mine Closure, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 99–106.
- Martín-Moreno, C, Tejedor, M, Martín Duque, JF, Nicolau, JM, Bladé, E, Nyssen, S, Lalaguna, L, De Lis, A, Cermeño-Martín, I & Gómez, JM (2018a), 'Natural drainage basins as fundamental units for mine closure planning: Aurora and Pastor I quarries', in D Priscu, (ed.), *Proceedings of the Second International Congress on Planning for Closure of Mining Operations*, Gecamin, Santiago, pp. 1–8.
- Martín- Duque, J. F., Sanz, M. A., Bodoque, J. M., Lucía, A., & Martín- Moreno, C. (2010). Restoring earth surface processes through landform design. A 13- year monitoring of a geomorphic reclamation model for quarries on slopes. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *35*(5), 531-548.
- Mossa, J., James, L.A., (2013). Impacts of mining on geomorphic systems. In: Shroder, J.F. (Ed.), Treatise on Geomorphology 13. Academic Press, San Diego, pp. 74–95.
- Martín Duque, J.F., Zapico, I., Oyarzun, R., López García, J.A., Cubas, P., (2015). A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: new insights and environmental implications from SE Spain. Geomorphology 239, 1–16.
- Martín-Moreno, C., Martín Duque, J.F., Nicolau Ibarra, J.M., Hernando Rodríguez, N., Sanz Santos, M.A., Sánchez Castillo, L., 2016. Effects of topography and surface soil cover on erosion for mining reclamation: the experimental spoil heap at El Machorro Mine (Central Spain). Land Degrad. Dev. 27, 145–159.
- McIntyre, N., Bulovic, N., Cane, I., McKenna, P., (2016). A multi-disciplinary approach to understanding the impacts of mines on traditional uses of water in Northern Mongolia. Sci. Total Environ. 557–558, 404–414.
- McKenna, G., Dawson, R., (1997). Closure planning practise and landscape performance at ٥٧ □□□□□□□□ and US mines. In: Proceedings of the 21 st Annual British Columbia Mine Reclamation. Symposium in Cranbrook,

BC, 1997. BCTRCR, British Columbia Technical and Research Committee on Reclamation, Cranbrook. pp. 74–۸۷.

– Messina, A.M., Biggs, T.W., (2016). Contributions of human activities to suspended sediment yield during storm from a small, steep, tropical watershed. J. Hydrol. 538, ۷۲۶–۷۴۲.

– Nicolau, J.M.,(2003). Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation. Land Degrad. Dev. 14, 215–226.

– Rosgen, D.L., (۱۹۹۴). A classification of natural rivers. Catena 22, 169–199.

– Rosgen, D.L., (۱۹۹۶). Applied River Morphology. Wildland Hydrology, Pagosa Springs.

– Rivas, V., Cendrero, A., Hurtado, M., Cabral, M., Giménez, J., Forte, L., del Río, L., Cantú, M., Becker, A., (2006). Geomorphic consequences of urban development and mining activities; an analysis of study areas in Spain and Argentina. Geomorphology 73, 185-206.

– SMCRA, 1977. Surface Mining Control and Reclamation Act. Public Law, 95–87, Statutes at Large, 91 Stat. 445. Federal Law, United States.

– Stiller, D.M., Zimpfer, G.L., Bishop, M., 1980. Application of geomorphic principles to surface mine reclamation in the semiarid West. J. Soil Water Conserv. 274–277.

- RIVERMorph (2019), Rivermorph, computer software, viewed 29 March 2019, http://www.rivermorph.com/

- Tarolli, P., & Sofia, G. (2016). Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. Geomorphology, 255, 140-161.

- Waygood, C (2014), Adaptative landform design for closure, in IM Weiersbye, AB Fourie & M Tibbett (eds.), paper presented at the Ninth International Conference on Mine Closure, Johannesburg, 1–3 October 2014.

- Zapico, I, Martín Duque, JF, Bugosh, N, Laronne, JB, Ortega, A, Molina, A, Martín-Moreno, C, Nicolau, N & Sánchez, L (2018), 'Geomorphic Reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: the Alto Tajo Natural Park, Spain', Ecological Engineering, vol. 111, pp. 100–116.

- Zapico, I., Molina, A., Laronne, J. B., Castillo, L. S., & Duque, J. F. M. (2020). Stabilization by geomorphic reclamation of a rotational landslide in an abandoned mine next to the Alto Tajo Natural Park. Engineering Geology, 264, 105321.

-