Vol.14, No.1, Spring 2025, pp.325-341 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

Research Article DOI: 10.22067/geoeh.2025.91975.1545 Open Access

Geomorphic Design and Modeling for Mine Reclamation: A Case Study of the Sangan Iron Ore Mine

Mahvash Naddaf Sangani[a], Seyed Reza Hosseinzadeh[b*], José F. Martín Duque[c], Mahnaz Jahadi Toroghi[d]

[a] PhD in Geomorphology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[b] Professor in Geomorphology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
[c] Associate Professor in Geomorphology, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain
[d] Assistant professor in Geomorphology, Payame Noor University of Mashhad, Mashhad, Iran

Article Info

Article history

Received :*3 February 2025*
Received in revised form: *3 March 2025*
Accepted :*8 March 2025*
Available online : *21 March 2025*

Keywords:

Geomorphic Reclamation, Sangan Iron Ore Mine, GeoFluv, Landform Design, Ecological Restoration

Abstract

Mining is a fundamental industrial activity that plays a crucial role in global economic development by supplying essential raw materials for various sectors, including construction, manufacturing, and energy production. However, despite its economic benefits, mining operations inevitably result in severe environmental degradation, disrupting natural ecosystems, altering hydrological cycles, and contributing to landscape instability. Large-scale excavation, removal of overburden, and waste disposal significantly modify topography, soil structure, and water resources, often leaving behind degraded and unproductive land. The extensive environmental footprint of mining necessitates the development and implementation of effective reclamation strategies to restore the ecological and geomorphological integrity of post-mining landscapes. This study demonstrates that geomorphic reclamation, particularly through the GeoFluv method, represents a scientifically robust and ecologically viable approach to post-mining landscape restoration. By leveraging principles of natural geomorphology and hydrology, this technique offers significant improvements in landform stability, erosion control, and ecological recovery compared to traditional methods. The findings contribute to the growing body of knowledge on sustainable mining reclamation, emphasizing the necessity of adopting science-based, landscape-oriented approaches in post-mining land management.

*.Corresponding author : Dr. Seyed Reza Hosseinzadeh E-mail address: srhosszadeh@um.ac.ir

How to cite this article: Naddaf Sangani, M., Hosseinzadeh, S. R., Duque, J. M., & Jahadi Toroghi, M. (2025). Geomorphic Design and Modeling for Mine Reclamation: A Case Study of the Sangan Iron Ore Mine. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(1), pp.325-341. DOI:https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.91975.1545

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Mining is one of the most significant human activities, exerting profound impacts on geomorphological and environmental systems. Large-scale mining operations, in particular, result in substantial alterations to topography, increased slope instability, accelerated soil erosion, a reduction in vegetation cover, and disruptions to hydrological cycles. These changes often disturb the geomorphic and ecological equilibrium of the environment, making the restoration of mined areas essential for re-establishing environmental stability and mitigating adverse effects. In recent years, innovative geomorphic restoration technologies, based on the principles of applied geomorphology and landscape design, have emerged as effective approaches for rehabilitating degraded mining lands. These methods involve simulating natural topography, designing drainage systems that mimic pristine environments, and implementing geomorphic processes to achieve a stable, dynamic equilibrium in the region. Geomorphic restoration techniques not only reduce erosion and enhance slope stability but also facilitate the recovery of natural ecosystems, improve soil permeability, and restore the hydrological functionality of the land. The Sangan Iron Ore Mine, one of the largest mining sites in Iran and the Middle East, exemplifies a mining area that has undergone extensive geomorphological changes due to large-scale extraction activities. With its mountainous topography, semi-arid climate, and distinct geological characteristics, this mine presents various challenges for post-mining restoration. This study examines geomorphic restoration methods applied to the Sangan mine, analyzing their effects on slope stability, erosion control, surface runoff management, and ecological rehabilitation. The primary objective is to develop a scientific and practical approach to mining land restoration, emphasizing geomorphological principles to establish efficient and sustainable reclamation models for similar mining regions.

Material and Methods

The Sangan iron ore mines are considered one of the largest mining areas in Iran and the richest ore deposits in the Middle East, located in a rectangular area with a length of 22 kilometers and a width of 10 kilometers. The materials used in this study include remote sensing tools such as satellite imagery, geological maps, and a 30-meter resolution Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model, and GIS software, in addition to field surveys and GeoFluv software. GeoFluv was employed to design stable and integrated landforms. Inspired by natural fluvial and slope processes, this software facilitates the design of functional drainage networks that align with pre-mining natural hydrological patterns. The primary objective of these designs is to create topographies that not only resemble natural landforms aesthetically but also function effectively in terms of hydrological stability and efficiency.

Results and Discussion

In this study, design input parameters, including local base-level elevation, drainage density, channel lengths, and slopes, were collected from stable reference areas near the mine site. These data were integrated into GeoFluv to generate landforms tailored to the region’s topographic and hydrological conditions. The results indicated that the designs developed using this approach led to landforms with high erosion resistance and improved hydrological performance. These landforms not only blend aesthetically and ecologically with the surrounding undisturbed landscapes but also enhance land productivity and long-term stability.

Conclusion

The findings of this paper demonstrate that the geomorphic reclamation approach can serve as an effective and sustainable solution for mine restoration, particularly for open-pit mines, in Iran and beyond. This method not only mitigates the environmental impacts of mining but also contributes to the ecological and economic improvement of the region by creating stable and naturally integrated topographies. This research represents a significant step toward advancing scientific and innovative methods for mine reclamation and the reclamation of degraded lands.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، صص ۳۴۱-۳۲۵

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.91975.1545 دسترسی آزاد

طراحی و مدلسازی ژئومورفیک در بازسازی سایت‌های معدنی

(مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان)

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

[۱] دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
[۲*] استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
[۳] دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه کمپلوتنسه مادرید، مادرید، اسپانیا
[۴] استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه پیام نور مشهد، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

کلمات کلیدی:

بازسازی ژئومورفیک

معدن سنگ آهن سنگان

ژئوفلِو

طراحی اشکال سطح زمین

بازسازی اکولوژیکی

چکیده

معدنکاری برای اقتصاد محلی و جهانی حائز اهمیت است، اما این عملیات به طور اجتناب ناپذیری منجر به آسیب های زیست محیطی قابل توجهی می شود و به دلیل این نوع فعالیت ها، پتانسیل اولیه چشم انداز به شدت تغییر می‌کند که پس از معدن‌کاری نیاز به بازسازی کاربری‌های جدید زمین دارد. فناوری‌های جدید برای بازسازی چشم‌انداز در دهه‌های اخیر در کنار شناخت اثرات زیست‌محیطی و انتظارات اجتماعی حاصل از یک سیستم بازسازی‌شده و یکپارچه پس از معدنکاری، توسعه و پیشرفت کرده‌اند. این فناوری امکان بازسازی فرم‌های زمین پس از معدن‌کاری را با استفاده از اصول طراحی ژئومورفیک (GeoFluv) فراهم کرده است. مدل‌سازی و طراحی شبکه‌های زهکشی در این روش به‌گونه‌ای انجام می‌شود که با هیدرولوژی طبیعی منطقه هماهنگ بوده و منجر به کاهش رواناب سطحی و افزایش نفوذپذیری خاک شود. این رویکرد علاوه بر بهبود عملکرد هیدرولوژیکی، شرایط لازم برای احیای پوشش گیاهی و بازگشت تنوع زیستی را فراهم می‌آورد . در این پژوهش، طراحی بازسازی ژئومورفیک با استفاده از این روش در معدن سنگ‌آهن سنگان مورد بررسی قرار گرفته است، به‌طوری‌که معیارهای ژئومورفولوژیک، هیدرولوژیک در طراحی فرآیند بازسازی مدنظر قرار گرفته‌اند تا یک چشم‌انداز پایدار و یکپارچه پس از معدن‌کاری ایجاد شود.

* نویسنده مسئول: دکتر سید رضا حسین زاده E-mail: srhosszadeh@um.ac.ir

مقدمه

استخراج معادن منافع اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی را برای جمعیت بشری جهان فراهم می‌کند. با این حال، معدن‌کاری یک فعالیت به شدت دگرگون‌کننده است که در آن زمین برای استخراج یا بهره‌برداری از یک منبع برداشت می‌شود (Mossa & James, 2013). معادن سطحی بر تمام اجزای اکوسیستم تأثیر می‌گذارد: توپوگرافی، هیدرولوژی سطحی و آب های زیرزمینی، خاک، پوشش گیاهی، جانوران، جو و چشم‌انداز (Nicolau, 2003; Duque, Zapico, Oyarzun, García & Cubas, 2015; Tarolli & Sofia, 2016). این باعث بسیاری از اثرات در محل می شود. فرسایش خاک یکی از مهمترین موارد است که مانعی بر سر راه موفقیت عملیات بازسازی است (Whisenant, 2005) و رشد پوشش گیاهی را از طریق مکانیسم های مختلف حذف دانه‌ها و مواد مغذی از خاک سطحی، حذف مستقیم گیاه و از دست دادن منابع آب از طریق رواناب سطحی تحت تاثیر قرار می‌دهد. فعالیت‌های معدنی همچنین می توانند اثرات خارج از سایت داشته باشند که می تواند برای محیط زیست بسیار مضر باشد. در این میان، تأثیر بر کیفیت آب مرتبط با بارهای رسوبی بالادست که از چاله‌ها، باطله‌ها یا تأسیسات معدنی به سیستم رودخانه‌ای تخلیه می‌شود، یکی از مضرترین آنها است (Martín-Moreno et al., 2018; McIntyre, Bulovic, Cane & McKenna, 2016; Zapico et al., 2017). مقررات معدنی در کشورهای توسعه یافته بر تضمین پایداری فیزیکی و شیمیایی پسماندها و سایت‌های معادن به عنوان اولین گام تمرکز دارد. یک چشم انداز پس از معدنکاری به ثبات فیزیکی (و در صورت وجود، پایداری شیمیایی) نیاز دارد. طراحی لندفرم در بازسازی معادن با استفاده از لندفرم‌های خطی یا پلکانی(رویکرد سنتی)، حتی با پوشش گیاهی موفق، اغلب در درازمدت پایدار نیستند. طراحی سنتی بازسازی چشم انداز اغلب بر اساس قضاوت ذهنی در مورد ظاهر چشم انداز یا کاربری مورد نظر با توجه کمی به عملکرد هیدرولوژیکی مناسب برای انتقال متعادل آب و رسوب از سطح زمین است. «رویکرد سنتی» برای بازسازی زمین معمولاً شکست می‌خورد، زیرا توپوگرافی‌های جدید اغلب خطی با شیب ثابت و یکنواخت یا با تراس‌ها و ساختارهای زهکشی غیرطبیعی هستند. چنین لندفرم‌هایی عملکردهای طبیعی را بازسازی نمی‌کنند و در دراز مدت پایدار نیستند. بدون تعمیر و نگهداری پرهزینه دائمی، بیشتر آنها به تدریج به لندفرم‌های طبیعی پیچیده شبیه می‌شوند (Haigh,1978; Sawatsky & Beersing, 2014).

در طی چند دهه گذشته، تحقیقات ژئومورفیک رودخانه‌ای روابط متمایزی بین چندین عامل مهم از جمله آب و هوا، دبی، شیب و مواد زمین را مشخص کرده است که کانال های آبراهه پایدار را تعریف می کنند (William, 1986; Bloom, 1978). ژئومورفولوژی مطالعه میان رشته‌ای و منظمی لندفرم ها و مناظر آنها و همچنین فرآیندهای سطح زمین است که آنها را ایجاد کرده و تغییر می‌دهد (IAG, 2014). ژئومورفولوژی می‌تواند نتایج محیطی را به ویژه برای سایت هایی که در معرض پویایی زمین در مقیاس بزرگ قرار دارند، تا حد زیادی بهبود بخشد. تقاضا برای معرفی اصول ژئومورفیک در بازسازی معدن در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ در ایالات متحده و استرالیا توسعه یافت. بازسازی ژئومورفیک که هنوز یک رشته جوان است، راه حلی است که به حل این مشکلات کمک می کند. در طول بازسازی ژئومورفیک، منظره به گونه‌ای طراحی و

شکل می‌گیرد که هم از ظاهر و هم - از همه مهمتر - عملکرد طبیعت تقلید کند. در لندفرم هایی که منعکس‌کننده شکل‌های طبیعی پایدار هستند، فرسایش خاک به حداقل می‌رسد، بنابراین حفاظت از مواد مغذی آزاد شده در اثر تجزیه، چرخه مواد آلی و تثبیت نیتروژن توسط میکروارگانیسم‌ها به حداکثر می‌رسد. به حداقل رساندن فرسایش خاک باعث افزایش جانشینی پوشش گیاهی می‌شود. اینها کارکردهای کلیدی مورد نیاز برای احیای سرمایه طبیعی در زمین‌های متروک و تخریب شده هستند (Bradshaw, 1997). هدف، برقراری مجدد تعادل دینامیکی خشن بین لندفرم ها و فرآیندها است و «تنظیم دقیق» را به فرآیندهای طبیعی واگذار می‌کند (Toy & Chuse, 2005).

در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوین بازسازی ژئومورفیک، مبتنی بر اصول ژئومورفولوژی کاربردی و طراحی چشم‌انداز، به‌عنوان رویکردی کارآمد برای بازسازی زمین‌های تخریب‌شده در اثر معدن‌کاری توسعه یافته‌اند. این روش‌ها شامل شبیه‌سازی توپوگرافی طبیعی، طراحی سیستم‌های زهکشی مشابه با محیط‌های بکر، و به‌کارگیری فرآیندهای ژئومورفولوژیکی در جهت ایجاد تعادل دینامیکی پایدار در منطقه است. روش‌های بازسازی ژئومورفیک علاوه بر کاهش فرسایش و افزایش پایداری دامنه‌ها، زمینه را برای احیای اکوسیستم‌های طبیعی، افزایش نفوذپذیری خاک، و بازیابی عملکرد هیدرولوژیکی زمین فراهم می‌کنند.

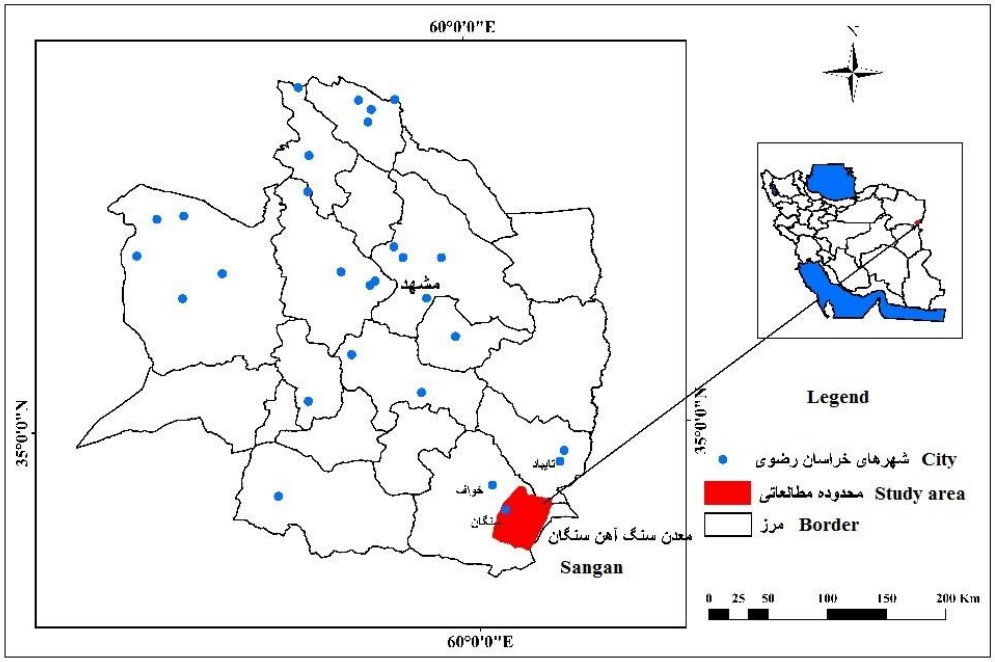
یکی از موفق ترین نمونه‌های ساخته شده، معدن زغال سنگ روباز لا پلاتا در نیومکزیکو است (Bugosh & Epp, 2019). بازسازی ژئومورفیک معادن در کانادا (Sawatsky & Beersing, 2014) و استرالیا نیز اعمال می‌شود (Kelder, Waygood & Willis, 2016). اسپانیا نمونه‌های قابل توجهی در این زمینه دارد (Zapico, Molina, Laronne, Castillo & Duque, 2020).

استخراج مجموعه معادن سنگان در بخشهای مختلف به روش استخراج سطحی و روباز صورت می‌گیرد که در سال های گذشته با توجه به تقاضاهای روز افزون اقتصادی و بهره برداری بیشتر موجب افزایش اختلال و بهم ریختگی چشم اندازها شده است. از هم گسیختگی سطح به طور قابل توجهی بر خاک، جانوران، گیاهان و آب های سطحی تأثیر می گذارد و در نتیجه بر انواع کاربری زمین تأثیر می گذارد. از جمله تغییر دادن توپوگرافی سطح زمین و تغییر دادن شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک که خود عمده ترین عامل در از بین بردن گیاهان، بوته‌های سطح زمین، به هم ریختن ترتیب قرارگیری افق‌های خاک، تقلیل پتانسیل باروری خاک می باشد. همچنین فعالیت معدنی باعث شده است که سطح در وضعیت تغییر ناپایدار قرار گیرد و مشکلاتی مانند ناپایداری شیب، خطرات زمین شناسی و آسیب به محیط زیست را به همراه داشته باشد. مشکل مهمی که وجود دارد این زمین ها بعد از برداشت آهن به حال خود رها شده است. با توجه به پیشینه گفته شده هدف از این پژوهش ارائه طراحی بازسازی ژئومورفیک در بزرگترین معدن سنگ آهن ایران و خاورمیانه جهت بازسازی لندفرم های آنتروپوژن ناشی از معدنکاری می‌باشد.

مواد وروش‌ها

موقعیت جغرافیایی

معادن سنگ آهن سنگان از بزرگترین مناطق معدنی در ایران و غنی ترین کانسارهای خاورمیانه محسوب می‌شود که در ناحیه‌ای مستطیل شکل با طول ۲۲ کیلومتر و عرض ۱۰ کیلومتر واقع شده است. این ذخایر سنگ آهن حاوی ۱.۲ میلیارد تن مگنتیت با درجه خلوص ۲۷ تا ۶۸٪ آهن است. این معدن در ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد و ۱۸ کیلومتری شمال شرقی شهر سنگان با عرض جغرافیایی '۲۴ °۳۴ تا '۵۵ °۳۴ شمالی، طول جغرافیایی'۱۶ °۶۰ تا '۵۰ °۶۰ شرقی دراستان خراسان رضوی (۳۰ کیلومتری غرب مرز افغانستان) شمال شرقی ایران قرار دارد (شکل۱). منطقه معدنی سنگ آهن سنگان از نظر ژئومورفولوژی واحدهای کوهستان، دشت سر و دشت تراکمی تشکیل شده است (شکل۲).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

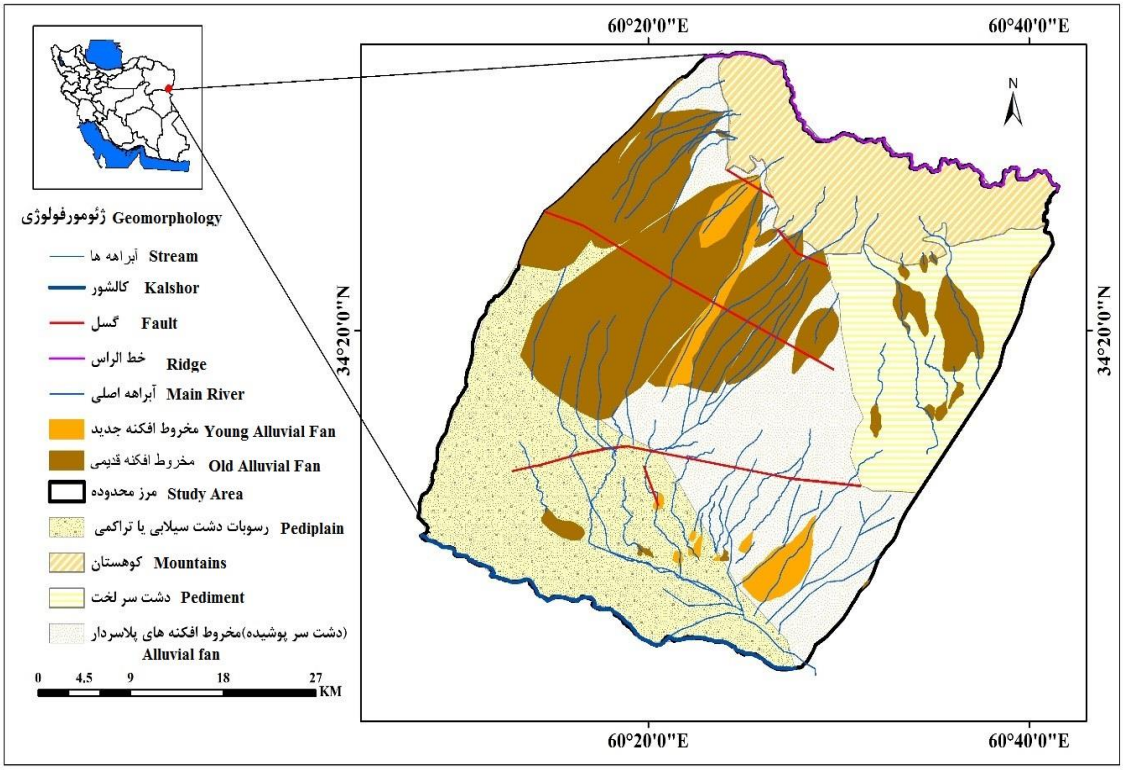
Fig. 1. Location of the study area

روش پژوهش

مواد مورد استفاده در این تحقیق ابزارهای سنجش از دور شامل تصاویر ماهواره‌ای، نقشه زمین شناسی و مدل رقومی ارتفاع(SRTM30m) و همچنین بازدیدهای میدانی از منطقه و نرم افزار GeoFluv می‌باشد. برای طراحی مدل بازسازی ژئومورفیک در معدن سنگ آهن سنگان از GeoFluv[1] استفاده شد. GeoFluv اولین بار

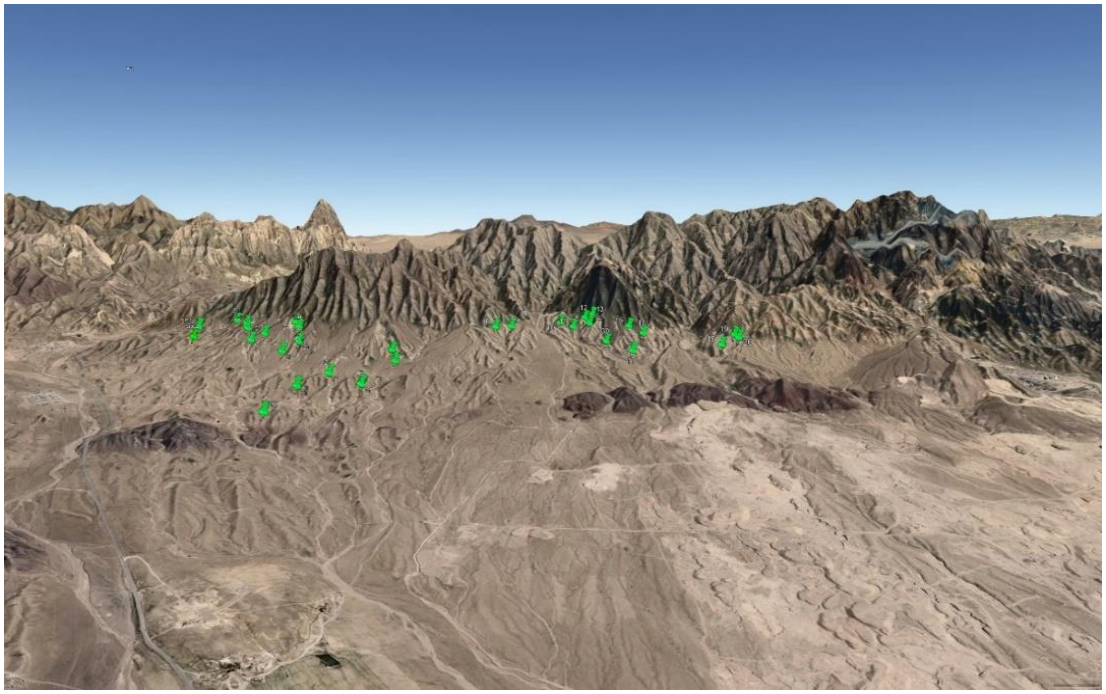
1 Geomorphology Fluvial

پس از استفاده موفقیت آمیز آن در معادن زغال سنگ نیومکزیکو که در سال ۱۹۹۹، مورد توجه قرار گرفت. این روش امکان طراحی لندفرم‌هایی را فراهم می‌کند که در پایان درجه‌بندی بازسازی به‌عنوان لندفرم های طبیعی بالغ عمل می‌کنند. این روش اساساً زمان را فشرده می‌کند و چشم اندازی با تعادل تقریبی بین نیروها و مقاومت‌های فرسایشی ایجاد می کند. برای مقادیر ورودی طراحی باید مناطق مرجع مناسب و پایدار از نظر فرسایش در نزدیکی سایت معدنکاری شده شناسایی شوند. این مقادیر برای ورودی طراحی از مناطق ارتفاعات در نزدیکی شمال غربی معدن از طریق بازدید میدانی و تصاویر ماهواره‌ای جمع‌آوری شد(شکل۳).



شکل۲- نقشه واحدهای ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه

Fig.2. Map of geomorphology units of the study area



شکل ۳- موقعیت نقاط اندازه‌گیری مقادیر ورودی
Fig.3. Location of input measurement

نتایج و بحث

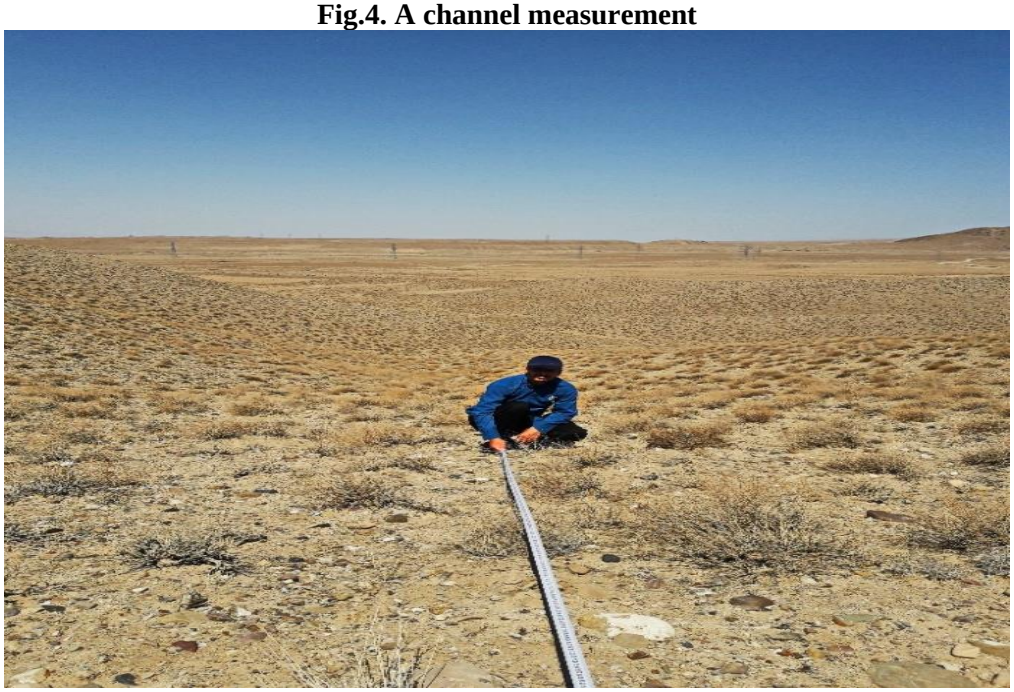
استخراج مقادیر ورودی های طراحی

ورودی‌های طراحی شامل انبوهی از پارامترهای مورفومتریک چشم انداز، مانند ارتفاع سطح اساس محلی، تراکم زهکشی، طول مستقیم جریان در کانال های نوع A با شیب بیشتر از ۴٪، پهنای کانال و فاصله از خط‌الراس تا سر کانال، شیب است. این ورودی‌ها به الگوریتم‌های GeoFluv 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، رویکرد GeoFluv به اطلاعاتی در مورد ارتفاع نقطه زهکشی محلی، شیب کانال در آن نقطه و همچنین برخی اطلاعات در مورد بارندگی محلی و رویدادهای رواناب نیاز دارد. این اندازه‌گیری‌ها بیان می‌کنند که چگونه مواد زمین در منطقه مرجع تحت دامنه وسیعی از شرایط آب و هوایی و پوشش گیاهی که در طول زمان اتفاق افتاده است، پاسخ داده‌اند. بنابراین ما نیاز داریم تا مناطق مرجعی را که در همان شرایط آب و هوایی و مواد زمینی مشابه مناطق معدنی که قرار است بازسازی شود، شناسایی کنیم. منطقه مرجع در ۲ کیلومتری شمال غربی معدن یافت شد. این منطقه لندفرم‌های پایداری داشت که به طور طبیعی بر روی مواد زمین‌شناسی شبیه به موادی که باید بازسازی شوند، ایجاد شده بود، همچنین در شرایط محیطی (اقلیمی) مشابهی با آنچه در معدن سنگ آهن سنگان غالب بود. پایداری ژئومورفیک منطقه با عدم وجود لندفرم‌هایی که فرسایش فعال یا حرکات توده‌ای را نشان دهند (مانند بریدگی، خندق) تعیین شد. مقادیر پارامترهای طول کانال نوع A

(شکل۴)، فاصله از سر کانال تا خطالراس (شکل۵)، تراکم زهکشی با استفاده از آبراهه‌های حاصله از تصاویر ماهواره‌ای، سینوسیته کانال اندازه گیری شد. مقادیر ورودی طراحی در جدول شماره (۱) مطرح شده است.

شکل ۴-اندازه‌گیری میدانی کانال های نوع A

Fig.4. A channel measurement



شکل ۵-اندازه‌گیری خطالراس تا سر کانال

Fig.5. Ridge to head of channel measurement

جدول۱- مقادیر پارامترهای ورودی طراحی

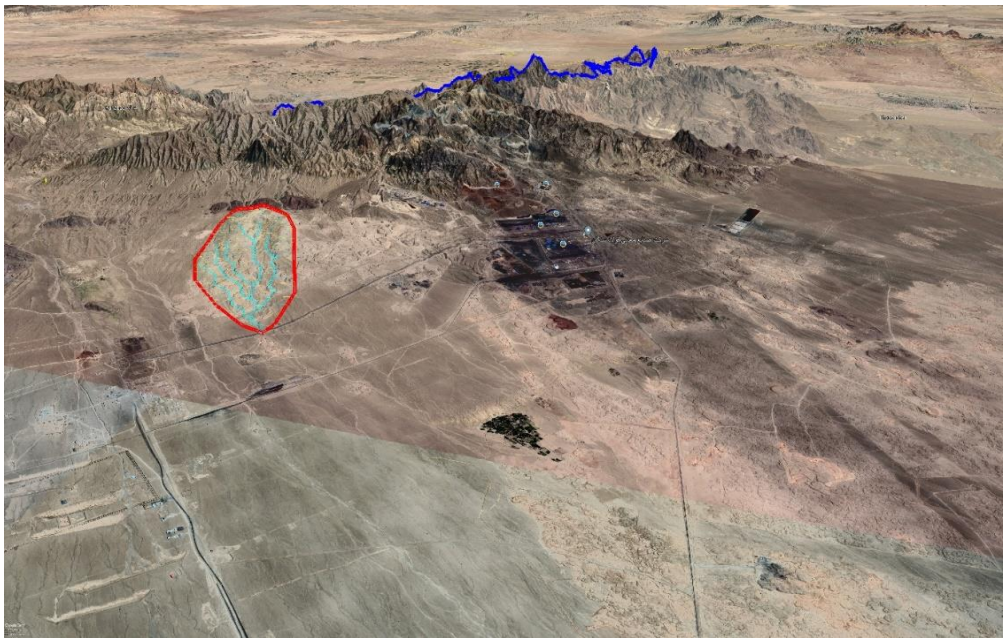
Table1- Design input parameter values

Value مقادیر	Input parameter	پارامتر ورودی
50m	Ridge to head of channel	فاصله از خط الراس تا سرکانال
90m	Length A channel	طول کانال نوع A
30m/ha	Drainage Density	تراکم زهکشی
1/2	Sinuosity	سینوسیته

طراحی و تنظیم لندفرم با استفاده از GeoFluv

در طرح‌های GeoFluv هدف اصلی طرح‌ریزی شبکه‌های زهکشی کاربردی است.GeoFluv یک روشی است که به دنبال تکرار مناظر مشابه با مناظری است که به طور طبیعی توسط فرآیندهای رودخانه‌ای و شیب تحت شرایط آب و هوایی و فیزیوگرافی در سایت ایجاد می‌شود. برای طراحی محدوده‌ای از زمین‌های تخریب شده ناشی از معدنکاری انتخاب و مطابق داده‌های بدست آمده از منطقه مرجع طراحی با استفاده از GeoFluv انجام شد (شکل ۶).

شکل ۷ یک نمای سه بعدی از خروجی GeoFluv طراح پیشنهادی را برای معدن سنگ آهن سنگان نشان می‌دهد. با هدف بازیابی عملکرد مشابه، از لندفرم های منطقه مرجع طبیعی تقلید می‌کند و با حجم باطله‌های موجود سازگار است.

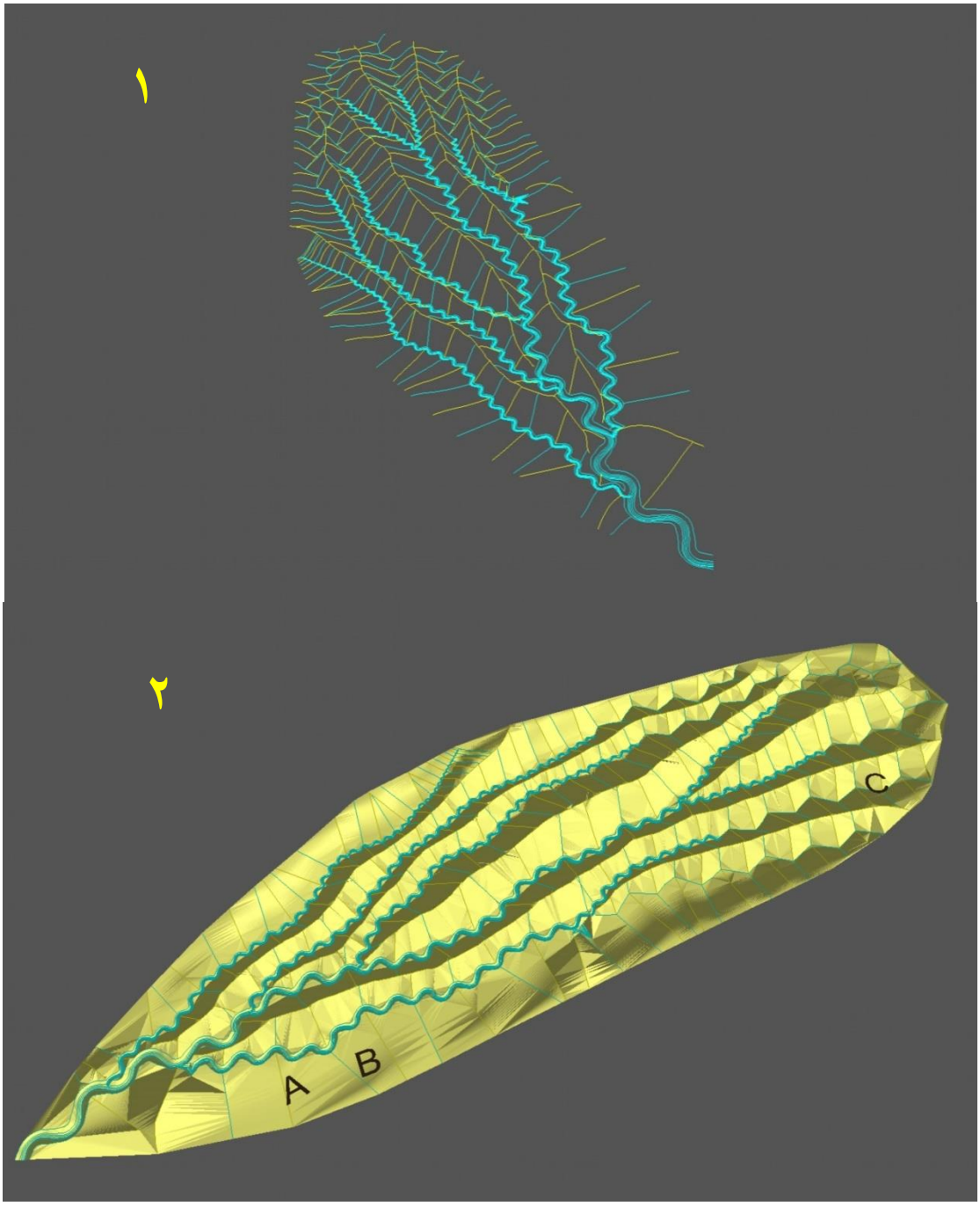


شکل ۶- موقعیت طراحی بازسازی ژئومورفیک در معدن سنگ آهن سنگان

Fig.6. Geomorphic reclamation design location in Sangan iron ore mine

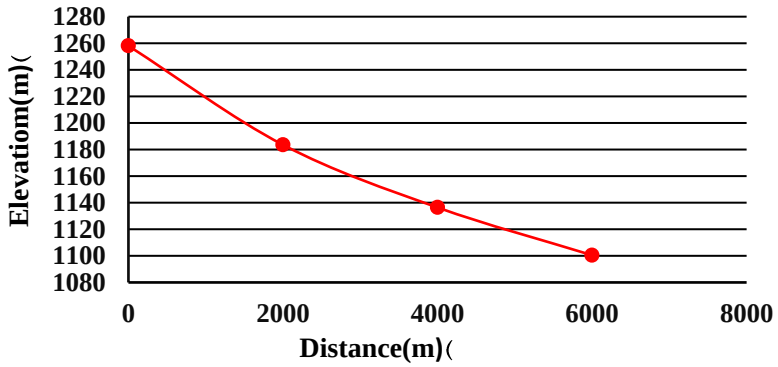
لندفرم‌های طراحی شده (شکل ۷) عبارتند از: (۱) کانال های نوع A با شیب بین ۴ تا ۱۰ درصد و کانال های Aa+ با شیب بیش از ۱۰ درصد (طبقه بندی روزگن) که هر دو دارای الگوی زیگزاگ مشخصه، سینوسیته کمتر از ۱.۲ بوده و توپوگرافی، متشکل ازخط الراس ها و خط القعرها. کانال‌های نوع A (زیگ زاگ)، که منجر به یک توپوگرافی محدب-مقعر پیچیده می‌شود. مقادیر ورودی های طراحی GeoFluv برای معدن سنگان ۳۰ متر در هکتار تراکم زهکشی، ۱۵۰ متر برای کانال A و حداکثر فاصله ۸۰ متر از خط الراس تا سر کانال است. متوسط شیب کانال های ساخته شده ۹.۷ درصد است. خط الراس‌ها و خط القعرها به ترتیب دارای شیب متوسط ۱۷ و ۴۰ درصد هستند. روش GeoFluv شیب‌های پیچیده‌ای را طراحی می‌کند که به طور مداوم در سه بعد تغییر می‌کنند تا انرژی رواناب را از بین ببرند و منبع رسوب را با تخلیه رواناب متعادل کنند، در نتیجه یک حالت پایدار متعادل بدون فرسایش تسریع شده حفظ می‌کنند، درست مانند لندفرم‌های منطقه مرجع طبیعی. بنابراین، مقادیر متوسط شیب زمانی که در بازسازی سنتی لندفرم ها ثابت در نظر گرفته می‌شود، ممکن است بالا به نظر برسد.

در شکل (۸) نیمرخ طولی کانال اصلی طراحی نمایش داده شده است. خصوصیات جنس مواد در سطح اساس مشخص می‌کند که پروفیل طولی کانال طراحی باید از شیب پایین دست سطح اساس استفاده کند یا خیر.



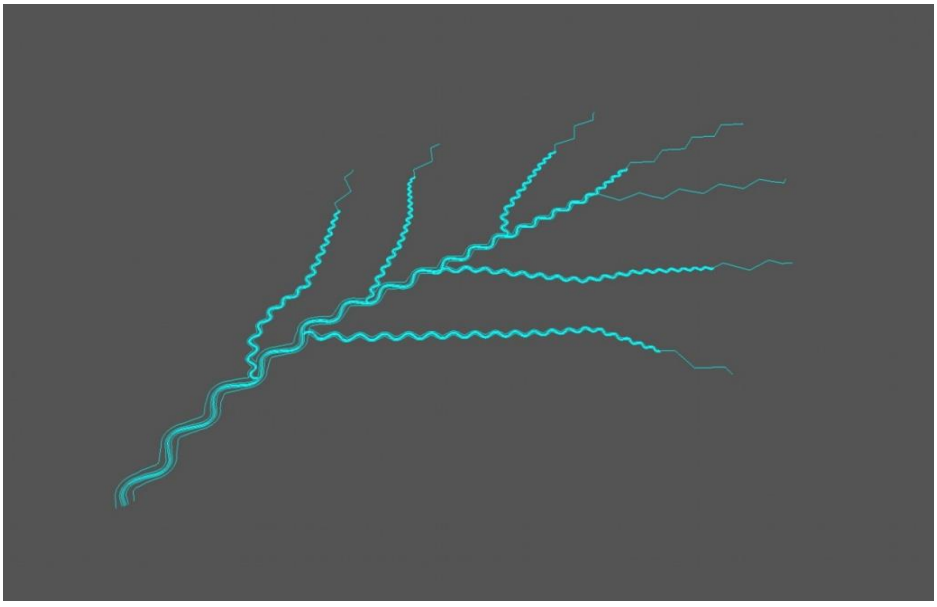
شکل ۷- دید سه بعدی(۱و۲) از طراحی ژئومورفورفیک منطقه مورد مطالعه(A خط الرأس‌های فرعی(زرد رنگ)، B خط القعرهای فرعی(آبی رنگ)، C کانال‌های نوع A با الگوی زیگزاگی

Fig.7. 3D view of the geomorphic design of the study area (A subridge (yellow color), B swales (blue color), C type A channels with zigzag pattern)



شکل ۸- پروفیل طولی آبراهه اصلی طراحی
Fig.8. Longitudinal profile of the main channel of the design

الف) اگر جنس مواد در سطح پایه سست باشد، پروفیل طولی کانال پایین دست باید شیب کانال بالادست سطح اساس را دنبال کند. هنگامی که کانال در مواد ناپایدار (مواد سست مانند آبرفت) تشکیل می‌شود، با کانال رسیده از بالا و پایین جریان سطح اساس با پروفیل طولی مقعر وصل می‌شود. تمام کانال‌های موجود در یک لندفرم پایدار در مواد غیرمتراکم در یک پروفیل طولی مقعر به هم متصل می‌شوند (شکل۹). توجه داشته باشید که پروفیل صاف و مقعر برای کانال در مواد غیر یکپارچه و سست مناسب است.



شکل ۹- اتصال آبراهه‌ها با پروفیل مقعر
Fig.9. Stream link with concave profiles

اما اگر جنس مواد در سطح پایه یکپارچه و مقاوم باشد، انتهای فوقانی نیمرخ طولی پایین دست می‌تواند در سطح اساس خاتمه یابد و یک پروفایل طولی جدید و متفاوت در بالادست سطح اساس ایجاد کند.

در پروفیل طولی کانال (شکل ۸) پروفیل طولی مقعر در سرچشمه تا جایی که دبی و انرژی فرسایشی کمتری دارد شیب بیشتری دارد و در قسمت‌های پایینی که دبی و انرژی فرسایشی بیشتری دارد صاف‌تر است. این یک ویژگی مهم کاربردی لندفرم‌های پایدار در مواد غیر یکپارچه و سست است. الگوی شبکه آبراهه‌ها در حوضه طراحی شده دندریتیک (شاخه درختی) است (شکل ۹)، زیرا الگوی شاخه درختی الگویی است که تمایل به تشکیل در مواد غیریکپارچه یا سست دارد. نمونه‌هایی از این جنس مواد می‌توانند شامل آبرفت (تراس، دشت سیلاب)، باطله‌ها پس از معدنکاری، رسوبات لغزش زمین، رسوبات یخبندان، لس، و مواد آبرفتی و غیره باشد. استخراج معادن می‌تواند صخره‌های یکپارچه را که قبلاً یک الگوی کانال کنترل ساختاری مانند مثلاً مستطیل شکل داده‌اند (الگوی مستطیل شکل هنگامی که رواناب از شکستگی (اتصالات) در سنگ سخت استفاده می‌کند و دره‌های حاصل از آن دارای کنترل ساختاری هستند، یعنی جهت‌گیری آنها از الگوهای مشترک در سنگ پیروی می‌کند. الگوی مستطیل شکل اغلب در سنگ ماسه سنگ یا سنگ آهک شکل می‌گیرد)، از بین ببرد. سنگ یکپارچه قبل به ماده‌ای غیریکپارچه تغییر یافته است که برای یک دوره در مقیاس زمانی زمین شناسی متفاوت رفتار خواهد کرد. تلاش برای مجبور کردن کانال ساخته شده در مواد غیر یکپارچه به یک الگوی ساختاری کنترل شده که در ماده یکپارچه شکل می‌گیرد یک تمرین بیهوده است (یا حداقل، ساخت و نگهداری آن گران است). زمین‌های استخراج‌شده (یا به‌شدت مختل‌شده) عموماً به تراکم زهکشی بیشتری نسبت به زمین دست‌نخورده نیاز دارند، زیرا سنگ بستر (که کمتر فرسایش‌پذیر بود) شکسته می‌شود و بازسازی شامل مواد تحکیم‌نشده‌ای (سست) است که بیشتر فرسایش‌پذیر است. همچنین تراکم زهکشی برای طرح پیشنهادی بازسازی نباید کمتر از تراکم زهکشی قبل از اختلال باشد. اگر تراکم زهکشی طراحی بازسازی کمتر باشد، سایت فرسایش می‌یابد تا اینکه به تراکم زهکشی مطلوبی برسد. همچنین، اگر این سایت در معرض "اثر استروئید[1]"(به این معنی است که پس از معدنکاری، مواد یکپارچه نیستند و متفاوت از مواد یکپارچه قبل از معدنکاری. یعنی اینکه مواد غیریکپارچه نیاز به تراکم زهکشی بیشتری دارند) باشد، تراکم زهکشی احیاء باید بیشتر از تراکم زهکشی قبل از ایجاد اختلال باشد زیرا مواد غیر یکپارچه تمایل به تشکیل تراکم بیشتر از مواد دست نخورده و یکپارچه دارند.

1 Asteroid effect

نتیجه‌گیری

فعالیت‌های معدنکاری سطحی، به‌ویژه در معادن روباز، معمولاً از چند سال تا چند دهه ادامه دارند و در نهایت منجر به تبدیل نواحی تحت معدنکاری به اراضی متروکه می‌شوند. این اراضی، به دلیل تغییرات شدید توپوگرافیک، خاک‌شناسی و هیدرولوژیکی، اغلب به‌عنوان منابع بحران‌زا در مقیاس محیط زیست و انسانی شناخته می‌شوند. معدن سنگ آهن سنگان، با مساحتی معادل ۲۲۳کیلومتر مربع در واحد ژئومورفولوژی کوهستان و ۱۲۳۳ کیلومتر مربع در قلمرو مخروط‌افکنه‌ها، نمونه‌ای از چشم‌اندازهای آنتروپوژنیک است که با تحولات ژئومورفولوژیکی غیرقابل‌بازگشت همراه بوده و پیامدهای جدی از جمله فرسایش خاک، تخریب پوشش گیاهی، کاهش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی، و افزایش ریزگردها را به همراه دارد. در این پژوهش، طراحی و مدلسازی ژئومورفیک به‌عنوان یک راه‌حل نوین و کاربردی برای بازسازی معادن متروکه معرفی شده است. این رویکرد، با الهام از فرآیندهای طبیعی ژئومورفولوژیکی، امکان احیای اراضی را در قالب یک سیستم تعادلی پایدار فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این تکنیک نه تنها به کاهش پدیده‌های بحران‌زا مانند فرسایش خاک، ریزگردها و آلودگی آب‌ها کمک می‌کند، بلکه به حفظ تنوع زیستی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و احیای پوشش گیاهی نیز منجر می‌شود. علاوه بر این، بازسازی ژئومورفیک با توجه به انعطاف‌پذیری و قابلیت تطبیق آن با شرایط مختلف ژئومورفولوژیکی، می‌تواند به‌عنوان یک الگوی عملیاتی برای بازسازی معادن روباز در سراسر ایران مورد استفاده قرار گیرد.

این مطالعه نشان می‌دهد که با اعمال استراتژی‌های ساماندهی و احیای اراضی مبتنی بر مدلسازی ژئومورفیک، می‌توان به اهداف کلیدی توسعه پایدار دست یافت، از جمله:

حفظ و احیای پوشش گیاهی: با ایجاد شرایط اکولوژیکی مناسب برای رشد گیاهان بومی.

کاهش فرسایش خاک: از طریق بازسازی توپوگرافی و تثبیت خاک‌ها.

مدیریت ریزگردها: با کاهش سطوح بدون پوشش و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت.

تغذیه آب‌های سطحی و زیرزمینی: از طریق طراحی شبکه‌های هیدرولوژیکی متناسب با شرایط منطقه.

در نهایت، این پژوهش نه تنها به عنوان یک مطالعه موردی در معدن سنگ آهن سنگان، بلکه به‌عنوان یک الگوی عملیاتی برای بازسازی علمی و پیشرفته معادن متروکه در سطح کشور مطرح می‌شود. این رویکرد، ضمن تأکید بر اصول پایداری محیط زیست، می‌تواند به کاهش هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی ناشی از فعالیت‌های معدنی کمک کرده و گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار معادن ایران باشد.

References

Bloom, A. L. (1978). *Geomorphology, a systematic analysis of late Cenozoic landforms*. New Jersey: Prentice Hall. https://doi.org/10.1029/98EO00163

Bradshaw, A. (1997). Restoration of mined lands—using natural processes. *Ecological Engineering*, *8*(4), 255-269. https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00022-0

Bugosh, N., & Epp, E. (2019). Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic-reclamation watersheds at La Plata Mine. *Catena*, *174*, 383-398. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.048

Duque, J. M., Zapico, I., Oyarzun, R., García, J. L., & 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. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.035

Haigh, M. J. (1978). The Evolution of Slopes on Artificial Landforms, Blaenavon, UK. Chicago: University of Chicago Press.

IAG. (2014). Web site of the International Association of Geomorphologists, IAG. http://www.geomorph.org/Accessed April 19, 2014.

Kelder, I., Waygood, C. G., & Willis, T. (2016). Integrating the use of natural analogues and erosion modelling in landform design for closure. In *Mine Closure 2016*: Proceedings of the 11th International Conference on Mine Closure . Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1608_04_Kelder

Martín-Moreno, C., Tejedor, M., Martín Duque, J. F., Nicolau, J. M., Bladé, E., Nyssen, S., ... & Gómez, J. M. (2018). Natural drainage basins as fundamental units for mine closure planning: Aurora and Pastor I quarries. In *Proceedings of the Second International Congress on Planning for Closure of Mining Operations, Gecamin, Santiago* , 1-8. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1915_12_Duque

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. *Science of the Total Environment*, *557*, 404-414. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.092

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. DOI:10.1016/B978-0-12-374739-6.00344-4

Nicolau, J. M. (2003). Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation. *Land Degradation & Development*, *14*(2), 215-226. https://doi.org/10.1002/ldr.548

Sawatsky, L., & Beersing, A. (2014). Configuring mine disturbed landforms for long-term sustainability. *Proceedings of Mine Closure Solutions*, 26-30. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/852_5

Tarolli, P., & Sofia, G. (2016). Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. *Geomorphology*, *255*, 140-161. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.007

Toy, T. J., & Chuse, W. R. (2005). Topographic reconstruction: a geomorphic approach. *Ecological Engineering*, *24*(1-2), 29-35. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.12.014

Whisenant, S. G. (2005). First steps in erosion control. In Mansourian, S., Vallauri, D., Dudley, N. (Eds.), *Forest Restoration in Landscapes*: Beyond Planting Trees. Springer (in cooperation with WWF), New York, 350–355. http://dx.doi.org/10.1007/0-387-29112-1

Williams, G. P. (1986). River meanders and channel size. *Journal of Hydrology*, *88*(1-2), 147-164. https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90202-7

Zapico, I., Laronne, J. B., Martín-Moreno, C., Martín-Duque, J. F., Ortega, A., & Sánchez-Castillo, L. (2017). Baseline to evaluate off-site suspended sediment-related mining effects in the Alto Tajo Natural Park, Spain. *Land Degradation & Development*, *28*(1), 232-242. https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90202-7

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. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105321