



Delineation of Groundwater Potential Zones in Nangarhar Province, Using RS, GIS, and Analytical Hierarchy Process (AHP)

Sayed Mohammad Tamim Hahsimi¹, Lutfullah Safi², Mohammad Rafiq Mangal³,
Mohammad Hamid Haqmal⁴

^{1,2,3,4} Department of Natural Resources Management, Faculty of Environmental Sciences, Kabul, Afghanistan

Email: tamimzahak8@ku.edu.af

Article History

Received:
June 1, 2026

Accepted:
July 27, 2026

Published:
September 22, 2026

Abstract

Groundwater is the main source of water supply in Afghanistan, especially in areas where access to surface water is difficult. Nangarhar Province has significant surface-water and groundwater resources and depends extensively on these resources for domestic and agricultural use, including orange orchards, vegetable cultivation, and sugarcane production. Therefore, detecting areas with suitable groundwater potential is essential for sustainable groundwater-resource management (SGRM) and well siting. The present study aimed to identify groundwater potential zones (GPZs) in Nangarhar Province using remote sensing (RS), geographic information systems (GIS), and the analytical hierarchy process (AHP). The study was applied in terms of purpose and employed a quantitative, analytical, and spatial methodology. Seven layers, including precipitation, slope, lithology, soil type, drainage density (DD), lineament density (LD), and land use/land cover (LULC), were analyzed in ArcGIS 10.8. The criteria were weighted through multi-criteria decision analysis (MCDA) using the AHP model and the weighted-overlay method. The results showed that the central, southern, and southeastern parts of the study area predominantly fell within the high- and very-high-potential classes, whereas the northern and northeastern parts were mainly characterized by low to moderate potential. Validation using 20 observation wells showed 80% agreement between the groundwater-potential map and the observed well locations. Simultaneously, sensitivity analysis indicated that limited changes in the criterion weights did not significantly affect the overall spatial pattern of the groundwater-potential map. The findings can support sustainable groundwater-resource management, well siting, agricultural planning, and improved groundwater development and management in the study area, especially in areas exposed to increasing water demand and future needs.

Keywords

AHP; Groundwater; Groundwater Potential; Nangarhar; RS and GIS

Citation: Hashimi, S. M. T., Safi, L., Rafiq Mangal, M., & Hamid Haqmal, M. (1405) Delineation of Groundwater Potential Zones in Nangarhar Province, Using RS, GIS, and Analytical Hierarchy Process (AHP). *Journal of Natural Sciences – Kabul University*, 9(2), 45–81. <https://doi.org/10.62810/jns.v9i2.581>



تعیین مناطق دارای ظرفیت آب زیرزمینی در ولایت ننگرهار با استفاده از RS، GIS و AHP

سید محمد تمیم هاشمی^۱، لطف الله صافی^۲، محمد رفیق منگل^۳، محمد حامد حقمیل^۴

^{۱،۲،۳،۴} دیپارتمنت مدیریت منابع طبیعی، پوهنځی محیط زیست، پوهنتون کابل، کابل، افغانستان

ایمیل: tamimzahak8@gmail.com

چکیده

آب زیرزمینی از جمله منابع اساسی و ضروری تأمین آب در افغانستان، به خصوص در مناطقی است که دسترسی به آب‌های سطحی محدود می‌باشد. ولایت ننگرهار با برخورداری از منابع مهم آب سطحی و زیرزمینی، برای مصارف شرب و فعالیت‌های زراعتی، از جمله باغ‌های مالت، کشت ترکاری و نیشکر، به این منابع وابسته است؛ از این رو، شناسایی مناطق دارای ظرفیت مناسب آب زیرزمینی برای مدیریت پایدار منابع آب و مکان‌یابی چاه‌ها اهمیت اساسی دارد. تحقیق حاضر به هدف تعیین مناطق دارای ظرفیت آب زیرزمینی در ولایت ننگرهار با استفاده از RS، GIS و روش AHP انجام شد. روش استفاده شده از نظر هدف کاربردی و از نظر رویکردی کمی، تحلیلی و مکانی بوده است. در این تحقیق، ۷ معیار شامل بارندگی، شیب، لیتولوژی، نوع خاک، تراکم زهکشی، تراکم شکستگی‌های خطی و استفاده/پوشش زمین در محیط ArcGIS 10.8 تحلیل گردید؛ سپس معیارها با مقایسه زوجی در مدل AHP وزن‌دهی و با روش همپوشانی وزنی ترکیب شدند. نتایج نشان داد که بخش‌های مرکزی، جنوبی و جنوب‌شرقی ساحه تحقیق عموماً دارای ظرفیت «زیاد» و «بسیار زیاد» بوده، در حالی که بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی بیشتر در طبقات «ضعیف» تا «متوسط» قرار دارند. همزمان، اعتبارسنجی با ۲۰ حلقه چاه مشاهده‌ای، ۸۰ درصد مطابقت را نشان داد. همچنین، تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر محدود وزن معیارها تأثیر مهمی بر نمونه کلی نقشه نداشته است. یافته‌های تحقیق می‌تواند در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، مکان‌یابی چاه‌ها و برنامه‌ریزی فعالیت‌های زراعتی مورد استفاده قرار گیرد.

تاریخچه

تاریخ دریافت:

۱۱ جوزا، ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۵ اسد، ۱۴۰۵

تاریخ نشر:

۳۱ سنبله، ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی

آب زیرزمینی؛ ظرفیت آب زیرزمینی؛ RS و GIS؛ AHP؛ ننگرهار

مقدمه

الحمد لله رب العالمين و الصلوة و السلام على سيد المرسلين و على آله و أصحابه أجمعين.

آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر زندگی، پایداری اکوسیستم‌ها، توسعه‌ی اقتصادی، امنیت غذایی، سلامت و رفاه انسان‌ها می‌باشد. علیرغم این‌که بخش اعظم سطح زمین توسط آب پوشیده شده است، تنها بخش بسیار محدودی از آن به‌صورت آب شیرین قابل استفاده برای انسان در دسترس قرار دارد. در این میان، آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و پایدارترین منابع آب شیرین جهان محسوب می‌شوند که در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش حیاتی در تأمین نیازهای شرب، زراعت و صنعت دارند (Beden et al., 2023; Pathmanandakumar & Thasarathan, 2021; Sinan & Razack, 2009). آب‌های زیرزمینی به آبی گفته می‌شود که در ناحیه‌ی مشبوع زیرسطح زمین و در میان منفذهای خاک و شکستگی‌های سنگ‌ها ذخیره شده و عمدتاً از طریق نفوذ آب باران، ذوب شدن برف و روان‌آب‌های سطحی تغذیه می‌گردد. این منابع در تعامل پیچیده با عوامل طبیعی؛ مانند شرایط اقلیمی، ساختار جیولوجیکی، نوع خاک، شیب زمین، پوشش نباتی و خصوصیات هایدرولوجیکی شکل می‌گیرند (Arkoprovo et al., 2012; Elmahdy & Mohamed, 2013). بنابراین، توزیع مکانی و کمی آب‌های زیرزمینی به شدت نامتوازن بوده و درک دقیق آن نیازمند تحلیل چندبعدی عوامل مؤثر می‌باشد. فشارهای ناشی از افزایش جمعیت، شهرنشینی سریع، توسعه‌ی فعالیت‌های صنعتی و زراعتی و مدیریت نامناسب منابع آبی، موجب افزایش برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در سطح جهان شده است. این روند در بسیاری از مناطق سبب کاهش شدید سطح آب زیرزمینی، افزایش هزینه‌های استخراج، خشک‌شدن چاه‌های کم‌عمق، نشست زمین و تخریب کیفیت منابع آبی گردیده است (Halder et al., 2023; Seyam et al., 2020). از طرف دیگر، استفاده‌ی وسیع از کودهای کیمیاوی در زراعت، آفت‌کش‌ها و سایر مواد کیمیاوی همراه با تخلیه‌ی فاضلاب‌های شهری و صنعتی، باعث ورود آلوده‌کننده‌ها به اکوفایر و افزایش خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی شده است (EPA, 2023; Hayat & Baba, 2017). در کنار این عوامل انسانی، تغییرات اقلیمی نیز به‌عنوان یکی از چالش‌های عمده‌ی قرن حاضر، تأثیر قابل توجهی بر چرخه‌ی هایدرولوجیکی و منابع آب زیرزمینی دارد. تغییر در الگوهای بارندگی، افزایش حرارت و افزایش نرخ تبخیر و تعرق، موجب کاهش میزان تغذیه‌ی طبیعی اکوفایر و افزایش تنش آبی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان شده است (Pholkern et al., 2018). در بسیاری از کشورها، به خصوص کشورهای جهان سوم، برداشت غیرقابل کنترل از آب‌های

زیرزمینی بدون در نظر گرفتن ظرفیت تجدید طبیعی آن انجام می‌شود که این امر در بلندمدت منجر به بحران‌های شدید محیط‌زیستی و اجتماعی می‌گردد. کاهش سطح آب زیرزمینی نه تنها دسترسی به آب آشامیدنی را محدود می‌سازد، بلکه هزینه‌های اقتصادی استخراج را افزایش داده و پایداری فعالیت‌های زراعتی را نیز تهدید می‌کند (Jamali & Tallou, 2020; Seyam et al., 2020). افغانستان از جمله کشورهایی است که به شدت وابسته به منابع آب زیرزمینی می‌باشد. در سال‌های اخیر، افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی، تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های مکرر، فشار شدیدی بر منابع آبی کشور وارد کرده است. در بسیاری از حوزه‌های آبی، به خصوص حوزه دریای کابل، سطح آب زیرزمینی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و عمق چاه‌ها از حدود ۱۰۰ متر در گذشته به بیش از ۳۰۰ متر در سال‌های اخیر افزایش یافته است (Mercy Corps, 2025). این وضعیت بیانگر بحران جدی در مدیریت منابع آب زیرزمینی در کشور می‌باشد (USAID, 2021). ولایت ننگرهار به‌عنوان یکی از مناطق مهم شرقی افغانستان، دارای اهمیت خاص از منظر منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد. وجود منابع آب سطحی؛ مانند دریای کابل، دریای کتر و شاخه‌های متعدد ناشی از کوه‌های سپین‌غر، در کنار اکوفایر زیرزمینی، این ولایت را به یک منطقه‌ی مهم هایدروئولوژیکی تبدیل کرده است. با این اوصاف، بخش قابل توجهی از جمعیت شهری و روستایی همچنان وابسته به منابع آب زیرزمینی برای مصارف معیشتی و زراعتی می‌باشند (Farahmand et al., 2025; RRERS, 2006). در شهر جلال‌آباد و ولسوالی‌های اطراف، آب آشامیدنی عمدتاً از طریق چاه‌ها تأمین می‌شود، در حالی‌که در مناطق روستایی، مردم بیشتر به کاریزها، چشمه‌ها و چاه‌های کم‌عمق وابسته‌اند. در ولسوالی‌هایی؛ مانند بهسود و رودات، به دلیل محدودیت دسترسی به سیستم‌های آبیاری سطحی، استفاده از چاه‌های عمیق برای زراعت به‌طور وسیع رایج است (MEW, 2022). این وضعیت در کنار افزایش تقاضا، موجب تشدید فشار بر اکوفایر زیرزمینی شده است. علاوه بر کاهش کمی منابع، کیفیت آب زیرزمینی نیز در بسیاری از مناطق ننگرهار با تهدید مواجه است. فعالیت‌های زراعتی، استفاده‌ی بیش از حد از کودها و آفت‌کش‌ها و نفوذ آلوده‌کننده‌ها به اکوفایر کم‌عمق، خطر آلودگی منابع آب را افزایش داده و نگرانی‌های جدی محیط‌زیستی و صحتی ایجاد نموده است (Jahish et al., 2024; Rasoli et al., 2025). بنابراین، مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در این ولایت نیازمند شناخت دقیق مناطق دارای ظرفیت مناسب و مناطق آسیب‌پذیر می‌باشد. در سال‌های اخیر با پیشرفت تکنالوژی‌های سنجش از دور و سیستم معلومات جغرافیایی (GIS)، تحول بزرگی در مطالعات منابع آب ایجاد کرده است. این ابزارها امکان تحلیل داده‌های مکانی و میدانی در مقیاس وسیع را فراهم ساخته و در ترکیب با مدل‌های تصمیم‌گیری

چندمعیاره؛ مانند پروسه تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها برای شناسایی مناطق دارای ظرفیت آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Agarwal et al., 2013; Beden et al., 2023). روش AHP با استفاده از مقایسه‌ی زوجی میان عوامل مختلف مؤثر بر آب زیرزمینی، امکان وزن‌دهی علمی به پارامترهایی؛ مانند بارندگی، شیب، زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، تراکم شکستگی‌های خطی، نوع خاک و استفاده زمین را فراهم می‌سازد. ترکیب این روش با GIS و RS، یک چارچوب قدرتمند برای تحلیل مکانی و تهیه‌ی نقشه‌های ظرفیت آب زیرزمینی فراهم می‌کند که در بسیاری از مطالعات جهانی نیز مورد تأیید قرار گرفته است (Arkoprovo et al., 2012; Shekhar & Pandey, 2014). تحقیق حاضر به هدف تعیین مناطق دارای ظرفیت آب زیرزمینی در ولایت ننگرهار، افغانستان، با استفاده از سنجش از دور، سیستم معلومات جغرافیایی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شده است. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در برنامه‌ریزی منابع آب، مدیریت پایدار اکوفایرها و بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در زمینه منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

اهداف تحقیق

هدف اصلی

تعیین مناطق دارای ظرفیت آب‌های زیرزمینی در ولایت ننگرهار، افغانستان، با استفاده از سنجش از دور، سیستم معلومات جغرافیایی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی.

اهداف فرعی

۱. شناسایی و تعیین اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر ظرفیت آب‌های زیرزمینی در ولایت ننگرهار.
۲. تهیه و طبقه‌بندی نقشه ظرفیت آب‌های زیرزمینی ولایت ننگرهار بر اساس ترکیب عوامل مؤثر و ارزیابی نتایج با استفاده از اطلاعات میدانی.

پیشینه تحقیق

مطالعه و شناسایی منابع آب زیرزمینی، به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از موضوعات مهم در مدیریت منابع آب به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم معلومات جغرافیایی، سنجش از دور و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، زمینه را برای شناسایی و تقسیم‌بندی مناطق بر اساس ظرفیت آب زیرزمینی فراهم ساخته است. در این روش‌ها، عوامل مختلف طبیعی و محیطی؛ مانند بارندگی، زمین‌شناسی، شیب زمین، تراکم شبکه زهکشی، تراکم شکستگی‌های خطی، خاک و استفاده از زمین با یکدیگر ترکیب گردیده و مناطق مختلف بر اساس میزان ظرفیت آب

زیرزمینی طبقه‌بندی می‌شوند. در مطالعات بین‌المللی، با استفاده از سنجش از دور، سیستم معلومات جغرافیایی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مناطق دارای ظرفیت آب زیرزمینی را در یک منطقه سنگی در هند شناسایی کردند. در این مطالعه عواملی؛ مانند جیومورفولوژی، زمین‌شناسی، خاک، شیب، تراکم شکستگی‌های خطی، ضخامت منطقه هوازده، تراکم زهکشی و بارندگی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب GIS و AHP می‌تواند ابزار مؤثری برای ارزیابی مکانی منابع آب زیرزمینی باشد. (Shekhar & Pandey, 2015) در افغانستان نیز استفاده از GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی ظرفیت آب زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است تنی و تایفور (۲۰۲۱)^۱، در مطالعه‌ای در حوزه دریایی کابل، با استفاده از GIS و AHP، هفت عامل شامل بارندگی، لیتولوژی، استفاده و پوشش زمین، شیب، خاک، تراکم زهکشی و تراکم شکستگی‌های خطی را مورد بررسی قرار دادند. پس از وزن‌دهی عوامل با استفاده از AHP و ترکیب آن‌ها در محیط GIS، مناطق مورد مطالعه به چهار دسته ظرفیت بسیار خوب، خوب، ضعیف و بسیار ضعیف تقسیم گردید. نتایج نشان داد که مناطق دارای ظرفیت بسیار خوب بیشتر در بخش‌های مرکزی و پایین‌دست حوزه دریایی کابل قرار دارند. همچنین، محققان بر اساس نتایج مطالعه دریافتند که حدود ۱۸ درصد از میانگین سالانه بارندگی می‌تواند به داخل زمین نفوذ کرده و در تغذیه آب‌های زیرزمینی سهم بگیرد (Tani & Tayfur, 2021). در ولایت بلخ، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مناطق دارای ظرفیت آب زیرزمینی را تقسیم‌بندی کردند. در این مطالعه هفت عامل شامل لیتولوژی، فاصله از رودخانه، شیب، تراکم زهکشی، استفاده و پوشش زمین، تراکم شکستگی‌های خطی و بارندگی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نهایی به چهار طبقه بسیار کم، کم، متوسط و زیاد تقسیم شد و برای ارزیابی نتایج از اطلاعات سطح آب چاه‌ها استفاده گردید. دقت کلی مدل حدود ۷۱ درصد گزارش شده است (Popalzai et al., 2023). در ولایت هرات نیز جیسیم و اوکازاکی (۲۰۱۸)^۲، با استفاده از GIS و دو مدل نسبت فراوانی (و آنتروپی شانون، ظرفیت آب زیرزمینی شهر هرات را بررسی کردند. در این مطالعه اطلاعات ۲۳۰ حلقه چاه برای اعتبارسنجی استفاده شد و ۱۱ عامل مؤثر شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحنا، سطح، لیتولوژی، استفاده و پوشش زمین و بافت خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل آنتروپی شانون عملکرد بهتری نسبت به مدل نسبت فراوانی داشته است؛ به‌گونه‌ای که میانگین مساحت زیر منحنی برای مدل آنتروپی شانون ۰,۷۳۲۸ و برای مدل

^۱ Tani & Tayfur (2021)

^۲ Gesim & Okazaki (2018)

نسبت فراوانی ۰,۷۱۶۶، به دست آمد (GESIM Nasir Ahmad, 2018). با وجود انجام مطالعات مهم در حوزه‌های کابل و ولایت‌های بلخ و هرات، تفاوت در شرایط زمین‌شناسی، اقلیمی، توپوگرافی، استفاده از زمین و وضعیت منابع آب در مناطق مختلف افغانستان، ضرورت انجام مطالعات منطقه‌ای و ولایت‌محور را نشان می‌دهد. ولایت ننگرهار از نظر منابع آب سطحی و زیرزمینی، فعالیت‌های زراعتی، رشد جمعیت و گسترش مناطق مسکونی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین، استفاده از داده‌های سنجش از دور، GIS و روش AHP می‌تواند زمینه مناسب برای شناسایی عوامل مؤثر و تقسیم‌بندی مناطق مختلف ننگرهار بر اساس ظرفیت آب زیرزمینی فراهم سازد. بررسی مطالعات موجود نشان می‌دهد که تحقیقات‌های انجام‌شده در افغانستان بیشتر بر حوزه دریایی کابل، ولایت کابل، بلخ و شهر هرات تمرکز داشته‌اند. ولایت ننگرهار یکی از ۵ شهرهای بزرگ افغانستان بوده از این رو، تحقیق حاضر با تمرکز بر این ولایت تلاش می‌کند با استفاده از عوامل مؤثر محیطی و هایدرولوژیکی و تلفیق آن‌ها در چارچوب GIS و AHP، مناطق مختلف ولایت را بر اساس ظرفیت آب زیرزمینی شناسایی و تقسیم‌بندی نماید.

روش تحقیق

تحقیق حاضر از نظر هدف کاربردی و از نظر روش کمی، تحلیلی و مکانی می‌باشد. در این تحقیق، از اطلاعات مکانی و موجود برای شناسایی مناطق دارای ظرفیت آب زیرزمینی استفاده شده است. این تحقیق با استفاده از سنجش از دور RS، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) انجام شده که مراحل اصلی تحقیق قرار ذیل می‌باشد:

۱. مطالعه اسنادی و جمع‌آوری داده‌های مکانی و اطلاعات مرتبط با ساحه تحقیق
۲. تهیه لایه‌های مؤثر بر ظرفیت آب زیرزمینی، شامل بارندگی، میل، لیتولوژی، نوعیت خاک، تراکم زهکشی، تراکم شکستگی‌های خطی و استفاده/پوشش زمین با استفاده از دیتای های خام وزارت انرژی و آب و اطلاعات بدست آمده از RS

۳. تحلیل اطلاعات تهیه لایه‌های استفاده شده تحقیق در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8

۴. وزن‌دهی معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و مقایسه زوجی معیارها

۵. ترکیب لایه‌های وزن‌دهی شده و تهیه نقشه نهایی مناطق دارای ظرفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش پوشش وزنی^۳

۶. اعتبارسنجی نتایج و ارزیابی میزان دقت نقشه نهایی با استفاده از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای (۲۰ حلقه چاه).

ساحه تحقیق

ولایت ننگرهار یکی از ولایات افغانستان است که در بخش شرقی کشور موقعیت داشته و مساحت مجموعی آن حدود ۷۷۲۴ کیلومتر مربع می‌باشد. این ولایت از شمال با ولایات کنر و لغمان، از غرب با ولایات کابل، لوگر و پکتیا و از شرق و جنوب با کشور پاکستان هم‌مرز است. بر اساس طبقه‌بندی حوزه‌های دریایی، ننگرهار در حوزه دریایی کابل قرار می‌گیرد. جمعیت تخمینی این ولایت حدود ۱،۸۰۵ میلیون نفر است که از این میان تقریباً ۱،۵ میلیون نفر در دهات زندگی می‌کنند. شهر جلال‌آباد مرکز این ولایت بوده و جمعیتی بیش از ۳۰۴،۹۹۵ نفر دارد. ولایت ننگرهار دارای ۲۱ ولسوالی می‌باشد که از جمله پرجمعیت‌ترین و متراکم‌ترین آن‌ها می‌توان به ولسوالی‌های بهسود، خوگیانی، کامه و سرخرو اشاره کرد. ننگرهار از منابع آبی وافر و جنگلات طبیعی برخوردار می‌باشد. مهم‌ترین و مشهورترین رودخانه‌هایی که از این ولایت عبور می‌کنند شامل دریای کابل از سمت شمال، دریای سرخرو از سمت غرب و دریای کنر از سمت شمال‌شرق می‌باشند. این رودخانه‌ها با یکدیگر یکجا شده و از طریق شهر جلال‌آباد جریان می‌یابند. این ولایت دارای اقلیم مدیترانه‌ای و معتدل بوده که تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های نسبتاً معتدل دارد. مهم‌ترین اکوفایر در ولایت ننگرهار، آب‌خوان یا اکوفایر جلال‌آباد است که مساحت آن حدود ۲۹۳ کیلومتر مربع و عمق آن ۵۲ متر می‌باشد. نوع آب‌خوان در این منطقه نیمه‌محصور^۴ است و لایه‌های بالایی سطح زمین تا عمق ۳ الی ۵ متر عمدتاً ترکیب از سیلت و رس همراه با مقدار کمی ریگ تشکیل شده‌اند. در اعماق بیشتر، لایه‌های زمین‌شناسی عمدتاً شامل ریگ، جغل و تخته‌سنگ‌ها می‌باشند.

علاوه بر این، اکوفایر مهم دیگری به نام اکوفایر بتی‌کوت نیز وجود دارد که مساحت آن حدود ۲۹۱ کیلومتر مربع بوده و ولسوالی‌های بتی‌کوت، مهمندره و (Mihran, 2011; National Water Affairs Regulation Authority (NWARA), 2019; NSIA, 2024) بر اساس معلومات وزارت زراعت، آبیاری و

3 Weighted Overlay

4 Semi-confined

مالداري، باغ‌های مالته در حدود ۱۳ ولسوالی این ولایت در مساحتی نزدیک به ۲۱۵,۶ جریب کشت می‌شوند که نقش مهمی در افزایش عواید محلی دارند. همچنان کشت نیشکر در سراسر این ولایت به‌طور گسترده رواج دارد (MAIL, 2025).

مراحل اجرای تحقیق

برای انتخاب پارامترهای اساسی ارزیابی ظرفیت آب زیرزمینی و تهیه نقشه GPZ بر اساس مرور مطالعات پیشین صورت گرفت (Beden et al., 2023). بر اساس اطلاعات و منابع موجود، مدل دیجیتلی ارتفاع، استفاده و پوشش زمین^۵، خاک و بارندگی، خاک و زمین‌شناسی برای این مطالعه در نظر گرفته شدند. مدل دیجیتلی ارتفاع^۶ با دقت ۳۰ متر و لایه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ از USGS تهیه شدند. LULC با دقت ۱۰ متر از سازمان ESA دریافت شد. داده‌های بارندگی با مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ از CHRS اخذ گردید. داده‌های خاک با دقت ۱۰ متر از وزارت انرژی و آب^۷ به‌دست آمد.

جدول ۱: مشخصات کلی پارامترها و داده‌های مورد استفاده در تحقیق

پارامتر	منبع	سال داده	تفکیک مکانی اولیه	تفکیک مکانی پس از پردازش	تاریخ دریافت
بارندگی	CHRS	میانگین ۱۹۸۰-۲۰۲۵	۰.۲۵° (~4 km)	10 m	2026-03-05
شیب	SRTM (NASA)	2000	30 m	10 m	2026-03-06
نوع خاک	MEW/AFG	2017	250 m	10 m	2026-03-07
لیتولوژی	USGS	2020	1:500,000	10 m	2026-03-08
استفاده و پوشش زمین (LULC)	ESA World Cover	2024	10 m	10 m	2026-03-12
تراکم شکستگی‌های خطی (LD)	استخراج شده از DEM (SRTM)	2000	30 m	10 m	2026-03-15
تراکم زهکشی (DD)	استخراج شده از DEM (SRTM)	2000	30 m	10 m	2026-03-25

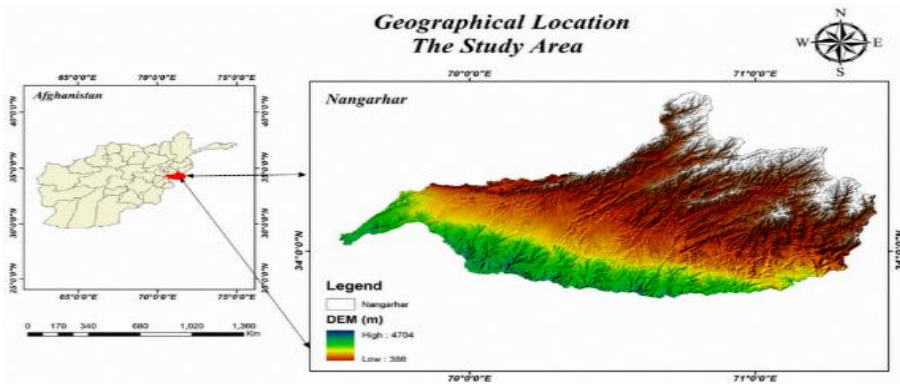
انتخاب پارامترهای مؤثر در تعیین مناطق دارای ظرفیت آب زیرزمینی بر اساس چهار معیار اصلی انجام شد: (۱) ارتباط مستقیم هایدروجیولوژیکی پارامتر با پروسه تغذیه، ذخیره و انتقال آب زیرزمینی، (۲) دسترسی و کیفیت اطلاعات مکانی، (۳) پوشش کامل منطقه مورد مطالعه و (۴) جلوگیری از تکرار

5 LULC

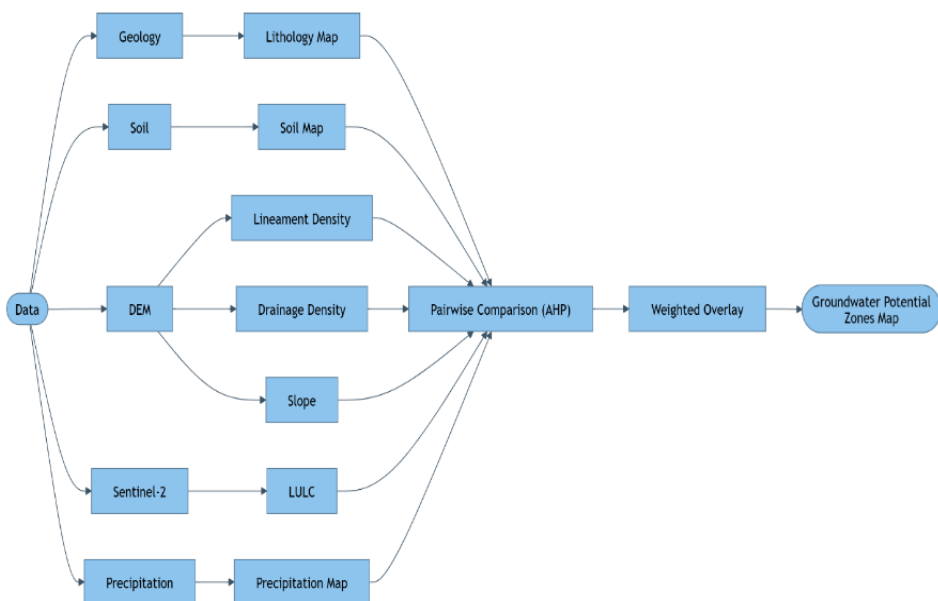
6 DEM

7 MEW

اطلاعات ناشی از هم خطی بین متغیرها. پارامترهایی؛ مانند ارتفاع، انحنای و شاخص رطوبت توپوگرافی^۸ در بسیاری از مطالعات به عنوان عوامل مؤثر استفاده شده اند؛ اما در تحقیق حاضر به دلیل محدودیت اطلاعات و احتمال هم پوشانی آن با سایر معیارهای انتخاب شده، در این مدل استفاده نشدند. ارتفاع عمدتاً از طریق ارتباط آن با شیب و شرایط توپوگرافی بر پروسه نفوذ تأثیر می گذارد، در حالی که شاخص رطوبت توپوگرافی که از دیم استخراج می گردد که با موجودیت شیب و تراکم زهکشی اطلاعات مشابه می تواند تولید کند از روند انتخاب معیار حذف گردید. همچنین، معیار فاصله از دریا در این مطالعه به صورت مستقل در نظر گرفته نشد؛ زیرا تأثیر دریاها بر تغذیه آب زیرزمینی تا حد زیادی از طریق معیارهای تراکم زهکشی، لیتولوژی و شیب زمین در نقشه منعکس شده است، چون هدف اصلی تحقیق ارزیابی ظرفیت آب زیرزمینی در مقیاس منطقه ای بوده، نه بررسی تأثیر وضعی دریاها بر اکوفایر که استفاده هم زمان از این معیار می توانست سبب هم پوشانی اطلاعات با سایر معیارهای هایدروئولوژیکی شود؛ نیز حذف گردید. با داشتن منابع مهم آب سطحی در ننگرهار، نقش آن ها در تغذیه آب زیرزمینی بیشتر از طریق عوامل محلی مانند نفوذپذیری بستر، شرایط زمین شناسی، خاک و شبکه زهکشی بررسی می گردد. در نهایت، ۷ معیار فوق از جمله مهم ترین عوامل مؤثر در شرایط هایدروئولوژیکی ننگرهار انتخاب و تمامی اطلاعات مذکور در محیط GIS پردازش و برای تحلیل نهایی آماده سازی گردیدند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی ناحیه تحقیق



شکل ۲: نمودار جریان کلی تحقیق

یافته‌ها

بعد از جمع‌آوری و تحلیل داده‌های خام (شکل ۲) توسط ArcGIS 10.8 موارد زیر حاصل، تشریح و بررسی گردید که در زیر به بحث آن می‌پردازیم:

بارندگی^۹

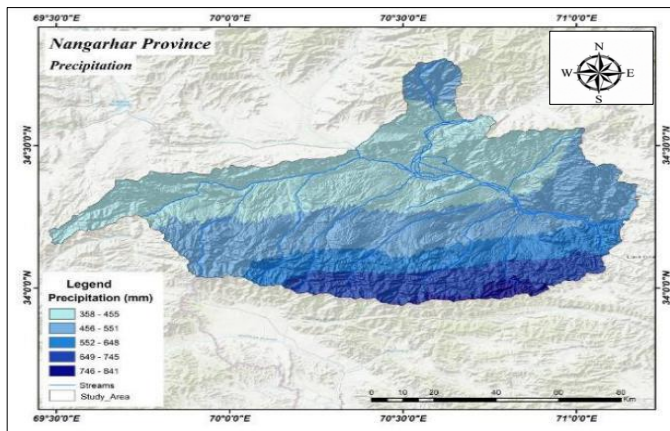
یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین عوامل تغذیه آب‌های زیرزمینی بارندگی محسوب می‌شود. عموماً، هرچقدر میزان بارندگی در یک منطقه بیشتر باشد، میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی نیز افزایش می‌یابد و برعکس، کاهش آن سبب کاهش ظرفیت آب زیرزمینی می‌شود. همچنان، شدت و دوام بارندگی تأثیر مستقیمی بر میزان نفوذ آب و رواناب سطحی دارد. تحلیل توزیع مکانی بارندگی و تهیه نقشه آن برای مطالعات هیدرولوجیکی و محیط‌زیستی از اهمیت خاص برخوردار است. برای این منظور، در محیط GIS از روش‌های مختلف؛ مانند کریجنک^{۱۰} و درونیابی با وزندهی معکوس فاصله^{۱۱} استفاده می‌شود (Beden et al., 2023). در این تحقیق، داده‌های بارندگی از مرکز (CHRS) دریافت گردید که

^۹ Precipitation

^{۱۰} Kriging Interpolation

^{۱۱} IDW

اطلاعات سال‌های (۱۹۸۰-۲۰۲۵) را در قالب رستر^{۱۲} ارائه می‌کند. با وجود اینکه اطلاعات رستری برای تحلیل‌های مکانی مناسب هستند، اما کیفیت اطلاعات دریافت‌شده پایین بود؛ از این رو، به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر، پردازش مجدد بر روی اطلاعات انجام شد. در مرحله نخست، داده‌های رستر در محیط GIS به داده‌های نقطه‌ای^{۱۳} تبدیل گردیدند؛ تا مقدار هر پیکسل به صورت یک نقطه نمایش داده شود. سپس، بر اساس این نقاط، نقشه توزیع مکانی بارندگی با استفاده از روش درونیابی کریجینگ^{۱۴} تولید شد. نقشه تولیدشده در این تحقیق برای نمایش توزیع جغرافیایی بارندگی در ساحه تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. میزان بارندگی سالانه در منطقه مورد مطالعه بین ۳۵۸ تا ۸۴۱ میلی‌متر متغیر بوده و به پنج طبقه شامل ۳۵۸-۴۵۵، ۴۵۶-۵۵۱، ۵۵۲-۶۴۸، ۶۴۹-۷۴۵ و ۷۴۶-۸۴۱ میلی‌متر در سال تقسیم‌بندی شده است. به طور کلی، میزان بارندگی در مناطق مرتفع بیشتر و در مناطق کم‌ارتفاع کمتر می‌باشد.



شکل ۳: نقشه سالانه بارش برای ساحه تحقیق

خاک^{۱۵}

خاک در پروسه تغذیه آب‌های زیرزمینی نقش اساسی دارد، زیرا آب‌های سطحی از طریق خاک و به واسطه پروسه نفوذ^{۱۶} به ذخایر آب‌های زیرزمینی وارد می‌شوند. به این خاطر، ساختار و خصوصیات فیزیکی خاک به طور مستقیم بر میزان نفوذ آب و ظرفیت تغذیه آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. میزان

^{۱۲} Raster

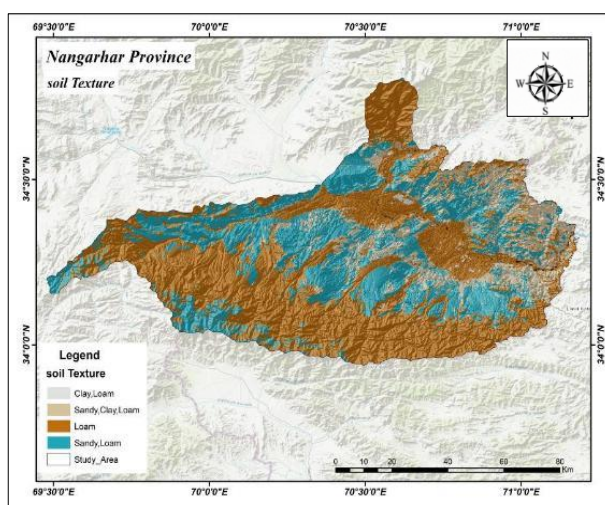
^{۱۳} Point Data

^{۱۴} Kriging Interpolation

^{۱۵} Soil

^{۱۶} Infiltration

تغذیه آب‌های زیرزمینی به‌طور مستقیم به نوع خاک و سرعت نفوذ^{۱۷} وابسته است. همچنین خصوصیات فیزیکی خاک مانند اندازه ذرات^{۱۸}، بافت و قابلیت هدایت آب^{۱۹} نقش مهمی در حرکت، ذخیره و توزیع آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کنند. به‌طور کلی، خاک‌هایی با بافت درشت‌دانه مانند خاک‌های ریگی^{۲۰} و جغل‌دار^{۲۱} دارای نفوذپذیری بالاتری هستند و برای تغذیه آب‌های زیرزمینی مناسب‌تر محسوب می‌شوند. در مقابل، خاک‌های ریزدانه مانند رس^{۲۲} دارای نفوذپذیری پایین بوده و مانع حرکت آب می‌شوند (Beden et al., 2023). برای این تحقیق، داده‌های خاک از وزارت آب و انرژی تهیه شده است. در تحقیق حاضر انواع مختلف خاک شناسایی شده‌اند، از جمله ریگ، رس و لوم. بر اساس تحلیل انجام‌شده، بیشترین وسعت ساحه تحقیق را خاک‌های لوم و لوم ریگی پوشش داده‌اند.



استفاده و پوشش زمین

استفاده و پوشش زمین^{۲۳} یکی از دیگر عوامل مهم در تغذیه آب‌های زیرزمینی و مدیریت منابع آب به‌شمار رفته و انواع مختلف آن به‌طور مستقیم بر میزان نفوذ، رواناب سطحی^{۲۴} و تبخیر تأثیر می‌گذارند، در نتیجه بر مقدار و توزیع آب‌های زیرزمینی اثرگذار می‌باشند (Beden et al., 2023). در این تحقیق،

¹⁷ *Infiltration Rate*

¹⁸ *Grain Size*

¹⁹ *Permeability*

²⁰ *Sandy*

²¹ *Gravelly*

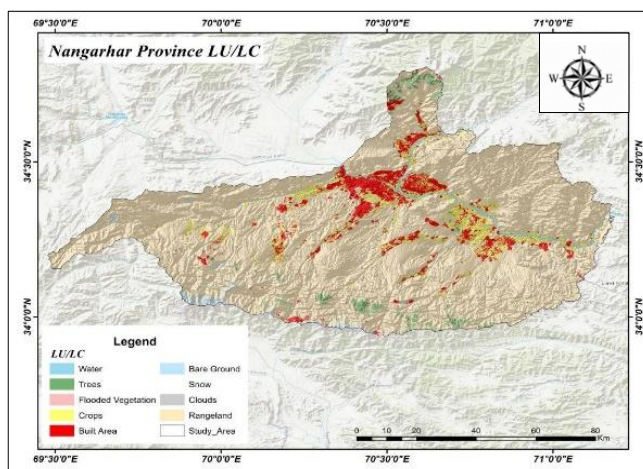
²² *Clay*

²³ *Land use & Land cover*

²⁴ *Runoff*

نقشه استفاده و پوشش زمین ولایت ننگرهار با استفاده از تخنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شده است. بر اساس تحلیل نقشه، ساحه مورد مطالعه به چندین طبقه اصلی تقسیم شده است که شامل منابع آبی، جنگل‌ها، پوشش گیاهی سیلابی، زمین‌های زراعتی، مناطق شهری، زمین‌های بایر و چراگاه‌ها می‌باشد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که زمین‌های زراعتی بیشترین وسعت را در ساحه تحقیق تشکیل می‌دهند و عمدتاً در امتداد رودخانه‌ها، به خصوص رودخانه کابل، قرار دارند. این وضعیت بیان‌کننده آن است که مناطق زراعتی در نزدیکی منابع آبی واقع شده و دارای شرایط مناسب خاکی هستند که محیط مناسب برای نفوذ آب و تغذیه آب‌های زیرزمینی فراهم می‌سازند. مناطق شهری که در نقشه با رنگ مشخص نمایش داده شده‌اند، عمدتاً در امتداد دریاها و بخش‌های مرکزی متمرکز هستند. این مناطق به دلیل وجود سطوح غیرقابل نفوذ مانند سرک‌ها و کوچه‌های قیریزی شده و کانکریتی، مانع نفوذ آب شده و باعث افزایش رواناب سطحی می‌گردند که در نتیجه، تغذیه آب‌های زیرزمینی در این نواحی کاهش می‌یابد.

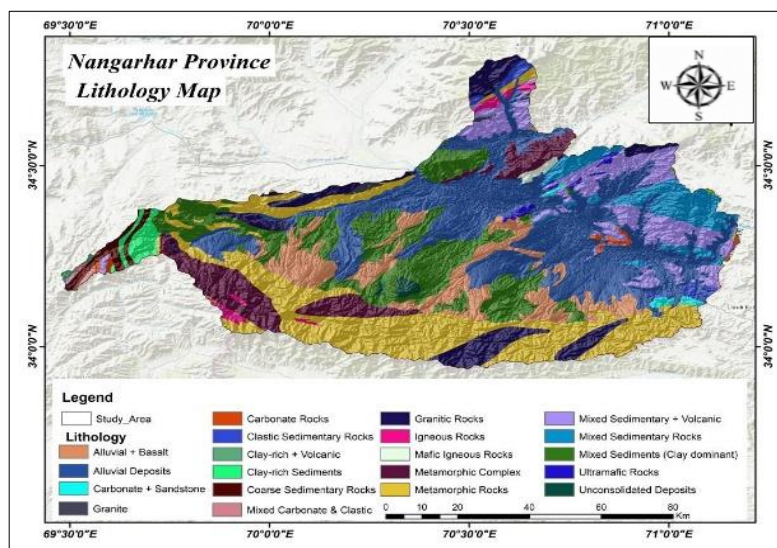
شکل ۵: نقشه استفاده و پوشش زمین برای ساحه تحقیق



لیتولوژی

خصوصیات زمین‌شناسی نقش مستقیمی بر میزان تخلخل یا منافذ دارند و این منافذ به‌طور مستقیم جریان آب‌های زیرزمینی را کنترل می‌کند. در مناطقی که میزان تخلخل بالا باشد، حرکت آب‌های زیرزمینی نیز افزایش یافته و در نتیجه ظرفیت ذخیره‌سازی آب در این مکان‌ها بیشتر خواهد بود (Beden et al., 2023). در این تحقیق، نقشه لیتولوژی بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی تهیه‌شده از مرکز زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تولید و تحلیل گردیده است. این اطلاعات متناسب با خصوصیات ساحه تحقیق، به واحدهای لیتولوژیکی مختلف طبقه‌بندی

شده‌اند که شامل آبراه^{۲۵}، ریگ (Sand)، آهک^{۲۶}، کانگلومریت، جغل سنگ^{۲۷}، رسوبات آتشفشانی^{۲۸}، مناطق تالابی و منابع آبی^{۲۹} می‌باشد. این واحدهای زمین‌شناسی دارای خصوصیات فیزیکی و هایدرولیکی متفاوتی هستند که به‌طور مستقیم بر نفوذ و حرکت آب تأثیر می‌گذارند. درساحه تحقیق، رسوبات آبرفتی و نواحی ریگی ای به دلیل داشتن تخلخل و نفوذپذیری بالا، شرایط مناسبی برای تغذیه آب‌های زیرزمینی فراهم می‌کنند. در مقابل، سنگ‌های سخت مانند بزالت و برخی از ترکیبات آهکی به دلیل نفوذپذیری پایین، جریان آب را محدود می‌سازند. در ادامه، شیپ فایل^{۳۰} لیتولوژی در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 با استفاده از ابزار فیوچر به رستر^{۳۱} به فارمت رستری تبدیل شد و سپس با دقت مکانی ۱۰×۱۰ متر^{۳۲} بازنمونه‌گیری^{۳۳} گردید تا برای تحلیل‌های بعدی آماده شود.



شکل ۶:

نقشه لیتولوژی ساحه تحقیق

²⁵ Alluvium

²⁶ Limestone

²⁷ Sandstone

²⁸ Volcanic Sediments

²⁹ Water Bodies

³⁰ shapefile

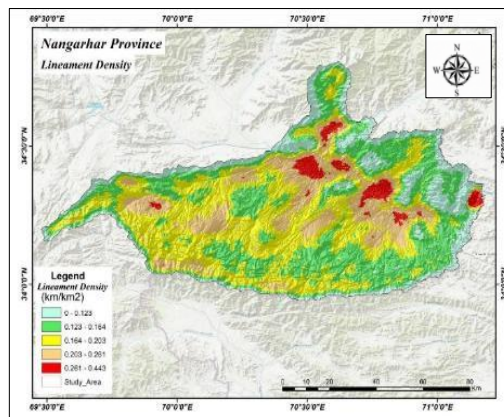
³¹ Feature to Raster

³² 10×10 m spatial resolution

³³ Resampling

تراکم شکستگی‌های خطی

تراکم شکستگی‌های خطی^{۳۴} به صورت مجموع طول خطوط، رگ‌ها و شکستگی‌های زمین شناسی در واحد سطح تعریف می‌شود و اطلاعات مهمی در مورد ساختار زمین، زون‌های شکستگی و تغییرات تکتونیکی ارائه می‌دهد. این پارامتر در ارزیابی ظرفیت آب‌های زیرزمینی نقش مهمی دارد؛ زیرا شکستگی‌ها مسیرهای مناسبی برای نفوذ و انتقال آب فراهم می‌کنند. بنابراین، تراکم بالای شکستگی‌های خطی معمولاً با افزایش تغذیه آب‌های زیرزمینی ارتباط مستقیم دارد (Beden et al., 2023). در این تحقیق، نقشه تراکم شکستگی‌های خطی برای ولایت ننگرهار با استفاده از مدل ارتفاع دیجیتلی در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.8 تهیه گردید. استخراج تراکم شکستگی از طریق تحلیل سایه تپه^{۳۵} انجام شد. مقادیر به دست آمده در پنج طبقه شامل ۰-۱۲۳، ۰-۱۶۴، ۰-۱۶۴، ۰-۱۶۴، ۰-۲۰۳، ۰-۲۰۳، ۰-۲۰۳، ۰-۲۰۳ و ۰-۲۶۱، ۰-۲۶۱، ۰-۴۴۳ کیلومتر مربع طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان می‌دهد که نواحی با تراکم بالای شکستگی‌های خطی (رنگ سرخ) عمدتاً در بخش‌های مرکزی و شمال شرقی منطقه متمرکز هستند که بیانگر شدت بالای تغییرات ساختاری و زون‌های شکستگی می‌باشد. این مناطق دارای شرایط مناسب برای نفوذ آب بوده و احتمال تغذیه آب‌های زیرزمینی در آن‌ها بالا است. در مقابل، نواحی با تراکم پایین شکستگی‌ها (رنگ‌های سبز و آبی) معمولاً دارای ساختارهای سخت و متراکم بوده و ظرفیت نفوذ آب در آن‌ها کمتر است. در مجموع، تحلیل تراکم شکستگی‌های خطی نشان می‌دهد که بخش‌هایی از ولایت ننگرهار که دارای بالا هستند از نظر ظرفیت دارای آب‌های زیرزمینی بسیار بالا می‌باشند و باید در برنامه‌ریزی مدیریت و بهره‌برداری منابع آب مورد توجه قرار گیرند.



^{۳۴} Lineament Density - LD

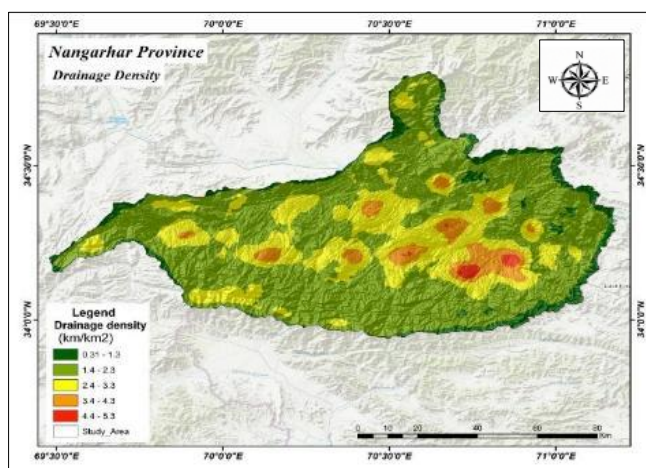
^{۳۵} Hill shade

شکل ۷: نقشه تراکم شکستگی‌های خطی ساحه تحقیق

تراکم زهکشی

تراکم زهکشی^{۳۶} به پنج طبقه تقسیم شده است و برای ساحه تحقیق ولایت ننگرهار مقادیر آن بین ۰,۳۱ الی ۵,۳ کیلومتر مربع متغیر می‌باشد. وضعیت شبکه زهکشی تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ساختار سنگ‌بستر^{۳۷}، پوشش نباتی، میزان بارندگی، خصوصیات خاک، شیب زمین و نفوذپذیری قرار دارد. نزدیکی شاخه‌های آبرو ها به یکدیگر به عنوان تراکم زهکشی تعریف می‌شود (Elango, 2017).

این شاخص مجموع طول آبراهه‌ها در واحد سطح را نشان می‌دهد الگوی زهکشی و تراکم آن اطلاعات مهمی درباره ساختار و توزیع آب‌های زیرزمینی ارائه می‌کند. تراکم زهکشی رابطه معکوس با ظرفیت آب‌های زیرزمینی دارد؛ به این معنا که مناطق با تراکم زهکشی پایین دارای ظرفیت ذخیره آب بالاتر بوده، در حالی که مناطق با تراکم زهکشی بالا ظرفیت کمتری برای ذخیره آب دارند (Machiwal et al., 2011). در این تحقیق، نقشه تراکم زهکشی با استفاده از دیم تهیه گردید در محیط ArcGIS 10.8 ابتدا دیم با استفاده از ابزار فل^{۳۸} اصلاح شد، بعداً جهت جریان^{۳۹} محاسبه گردید و در ادامه تجمع جریانات (Flow Accumulation) تعیین شد. بر اساس این مراحل، شبکه آبراهه‌ها استخراج و در نهایت تراکم زهکشی محاسبه گردید. نتایج در پنج طبقه ۰,۳۱-۱,۴، ۱,۴-۲,۳، ۲,۳-۴,۴ و ۴,۴-۵,۳ کیلومتر بر کیلومتر مربع طبقه‌بندی شد.



۰,۳۱-۱,۴، ۱,۴-۲,۳، ۲,۳-۴,۴ و ۴,۴-۵,۳ کیلومتر بر کیلومتر مربع طبقه‌بندی شد.

^{۳۶} Drainage Density - DD

^{۳۷} Bedrock Structure

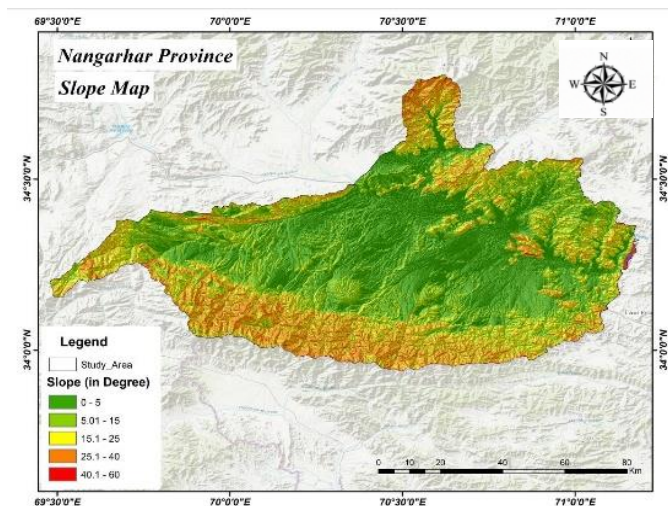
^{۳۸} Fill

^{۳۹} Flow Direction

شکل ۸: نقشه تراکم زهکشی ساحه تحقیق

شیب

میل زمین^{۴۰} یکی از عوامل مهم در تغذیه آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود و به‌طور مستقیم بر نفوذ و جریان آب تأثیر می‌گذارد. در مناطق با شیب کم، رواناب سطحی کاهش یافته و امکان نفوذ آب افزایش می‌یابد. در مقابل، در مناطق با شیب زیاد، رواناب افزایش یافته و تغذیه آب‌های زیرزمینی کاهش می‌یابد؛ بنابراین شیب رابطه معکوس با تغذیه آب‌های زیرزمینی دارد (Santra & Bhowmick, n.d.). در این تحقیق، نقشه میل از داده‌های دیم با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تهیه گردید. ساحه تحقیق بر اساس شیب به پنج طبقه شامل ۰-۵، ۵-۱۵، ۱۵-۲۵، ۲۵-۴۰ و ۴۰-۶۰ درجه تقسیم‌بندی شد. نتایج نشان می‌دهد که بخش‌های شمالی و مرکزی ولایت ننگرهار عمدتاً دارای میل کم (۰-۱۵ درجه) هستند که شرایط مناسبی برای نفوذ آب و تغذیه آب‌های زیرزمینی فراهم می‌کنند. در مقابل، بخش‌های جنوبی و برخی مناطق شرقی دارای شیب بالا (۲۵-۶۰ درجه) بوده و در آنها رواناب سطحی زیاد و نفوذ آب محدود می‌باشد. در مجموع، تحلیل شیب نشان می‌دهد که مناطق با شیب کم برای تغذیه آب‌های زیرزمینی بسیار مناسب بوده، در حالی که مناطق با شیب زیاد از نظر ظرفیت تغذیه آب‌های زیرزمینی اهمیت کمتری دارند.



شکل ۹: نقشه شیب ساحه تحقیق

⁴⁰ Slope

تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از پروسه تحلیل سلسله‌مراتبی

هر یک از پارامترهای مؤثر بر تغذیه و ذخیره آب‌های زیرزمینی نقش متفاوتی در تشکیل و توسعه اکوفایر دارند، باید میزان اهمیت نسبی هر عامل به‌صورت علمی تعیین گردد. در این تحقیق، به‌منظور تعیین وزن نسبی عوامل مؤثر بر ظرفیت آب‌های زیرزمینی، از روش پروسه تحلیل سلسله‌مراتبی^{۴۱} استفاده شد. این روش یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^{۴۲} بوده که توسط ساعتی^{۴۳} توسعه داده شده و امروزه به‌طور گسترده در مطالعات منابع آب، محیط‌زیست و رشته‌های زمین‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد (SAATY, 1987). ترکیب روش یاد شده با سیستم اطلاعات جغرافیایی امکان ارزیابی همزمان چندین عامل مؤثر بر تغذیه آب‌های زیرزمینی را فراهم نموده و زمینه تولید نقشه‌های ظرفیت آب زیرزمینی را با دقت بیشتر مهیا می‌سازد (Agarwal et al., 2013; Elmahdy & Mohamed, 2013). در این روش، ابتدا عوامل مؤثر انتخاب شده، سپس بر اساس مقایسه زوجی وزن هر عامل تعیین گردیده و در نهایت تمامی لایه‌ها با استفاده از تحلیل همپوشانی وزنی در محیط GIS ترکیب می‌شوند. در تحقیق حاضر، پروسه تحلیل سلسله‌مراتبی در چهار مرحله اساسی انجام شد:

۱. انتخاب پارامترهای مؤثر بر ظرفیت آب زیرزمینی؛

۲. تشکیل ماتریس مقایسه زوجی؛

۳. محاسبه وزن نهایی هر پارامتر؛

۴. ارزیابی سازگاری ماتریس مقایسه زوجی.

وزن‌دهی معیارهای مؤثر در این تحقیق بر اساس مرور مطالعات پیشین در حوزه مدل‌سازی ظرفیت آب‌های زیرزمینی و کاربرد روش پروسه تحلیل سلسله‌مراتبی در مناطق مشابه انجام شده است (Agarwal et al., 2013; Machiwal et al., 2011; Beden et al., 2023). اطلاعات حاصل شده در این تحقیق از نظریات مستقیم متخصصین نبوده، اما ماتریکس مقایسه زوجی با توجه به اهمیت نسبی عوامل در محیط طبیعی منطقه تنظیم گردید. بارندگی با وزن ۴۰ درصد بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داده،

^{۴۱} Analytic Hierarchy Process (AHP)

^{۴۲} MCDA

^{۴۳} Saaty

زیرا در شرایط اقلیمی این لایت بارندگی یکی از منابع اصلی تغذیه طبیعی اکوفایر ها محسوب می شود. لیتولوژی با وزن ۱۹ درصد به دلیل نقش اساسی در کنترل تخلخل، نفوذپذیری و ظرفیت ذخیره سازی آب زیرزمینی در رتبه دوم قرار گرفت. تراکم شکستگی های خطی با وزن ۱۵ درصد نیز به دلیل فراهم کردن مسیرهای انتقال آب در سازندهای سنگی اهمیت قابل توجهی نشان داد. در مقابل، شیب با وزن ۳ درصد کمترین اهمیت را دریافت کرد، زیرا بخش وسیعی از مناطق دارای ظرفیت بالای آب زیرزمینی در دشت های هموار و کم شیب قرار داشته و اثر شیب نسبت به سایر عوامل کمتر بوده است

جدول ۲: مقیاس مقایسه زوجی مورد استفاده در روش پروسه تحلیل سلسله مراتبی (SAATY, 1987)

درجه اهمیت	تعریف	توضیح
۱	اهمیت مساوی	دو معیار تأثیر یکسان دارند
۳	اهمیت متوسط	یک معیار اندکی مهم تر از معیار دیگر است
۵	اهمیت قوی	یک معیار به طور واضح مهم تر است
۷	اهمیت بسیار قوی	برتری یک معیار کاملاً مشهود است
۹	اهمیت مطلق	یک معیار به صورت کامل غالب است
۸, ۶, ۴, ۲	مقادیر میانی	برای قضاوت های بینایی استفاده می شود

انتخاب پارامترهای مؤثر بر ظرفیت آب زیرزمینی

انتخاب پارامترهای مناسب یکی از مهم ترین مراحل تحلیل سلسله مراتبی محسوب می شود، چون دقت نهایی نقشه ظرفیت آب زیرزمینی وابسته به میزان ارتباط این عوامل با پروسه تغذیه اکوفایر است. بارندگی مهم ترین منبع تأمین آب نفوذی به اکوفایر بوده و افزایش آن موجب افزایش میزان تغذیه آب های زیرزمینی می شود. بنابراین در اکثر تحقیقات، بارندگی به عنوان مهم ترین عامل مؤثر بر ظرفیت آب زیرزمینی شناخته می شود. استفاده و پوشش اراضی نیز از طریق کنترل میزان نفوذ و رواناب سطحی بر تغذیه اکوفایر تأثیر می گذارد. مناطق دارای پوشش گیاهی، جنگلات و زمین های زراعتی معمولاً شرایط مساعدتری برای نفوذ آب فراهم می کنند، در حالی که مناطق شهری و سطوح غیرقابل نفوذ سبب افزایش رواناب و کاهش تغذیه آب های زیرزمینی می شوند. لیتولوژی یکی از مهم ترین عوامل زمین شناسی کنترل کننده ذخیره و انتقال آب زیرزمینی است. رسوبات درودخانه یی، ریگی و جغلی به دلیل تخلخل و نفوذپذیری بالا شرایط مناسبی برای ذخیره آب فراهم می نمایند، در حالی که سنگ های ناریه یی و میتامورفیک معمولاً ظرفیت کمتری برای ذخیره آب دارند. تراکم شکستگی های خطی نیز یکی از شاخص های مهم در مطالعات هایدرو جیولوجیکی محسوب می شود. شکستگی ها و درز ها؛ مسیرهای مناسبی برای نفوذ و انتقال آب ایجاد می کنند. بنابراین، افزایش تراکم خطوط های آبی معمولاً با افزایش ظرفیت آب زیرزمینی همراه است. شیب زمین از طریق کنترل سرعت رواناب و

مدت زمان پایداری آب بر سطح زمین بر میزان نفوذ تأثیر می‌گذارد. مناطق کم‌شیب فرصت بیشتری برای نفوذ آب داشته و در نتیجه ظرفیت بالاتری برای تغذیه اکوفایر دارند. در مقابل، مناطق پرشیب معمولاً دارای رواناب بیشتر و نفوذ کمتر هستند. تراکم زهکشی نیز شاخصی از توسعه شبکه آبراهه‌ها بوده و ارتباط نزدیکی با نفوذپذیری سطح زمین دارد. مناطق دارای تراکم زهکشی پایین معمولاً دارای نفوذپذیری بیشتر و ظرفیت بالاتر آب زیرزمینی هستند، در حالی که تراکم زهکشی بالا بیان‌کننده افزایش رواناب سطحی و کاهش نفوذ آب است. نوع خاک نیز بر میزان نفوذ آب و ظرفیت نگهداری رطوبت تأثیر مستقیم دارد. خاک‌های ریگی و لوم ریگی به دلیل تخلخل بالا نفوذپذیری بیشتری داشته و شرایط مناسب‌تری برای تغذیه آب‌های زیرزمینی فراهم می‌کنند، در حالی که خاک‌های رسی دارای نفوذپذیری کمتری هستند (Beden et al., 2023).

ساخت ماتریس مقایسه زوجی

ماتریکس مقایسه زوجی 7×7 بر اساس مقیاس استاندارد ۱ تا ۹ ساعتی تهیه گردید. در این ماتریس، اهمیت هر معیار در مقایسه با معیارهای دیگر مشخص شد. اعداد بزرگ‌تر نشان‌دهنده اهمیت بیشتر یک معیار نسبت به معیار دیگر است. برای حفظ توازن محاسبات، مقادیر مقایسه‌ها به صورت معکوس در طرف دیگر ماتریکس قرار داده شدند. سپس وزن نهایی هر معیار محاسبه گردید. جدول زیر ماتریس مقایسه زوجی استفاده‌شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۲: ماتریس مقایسه زوجی معیارهای مؤثر بر ظرفیت آب زیرزمینی

معیار	بارندگی	لیتولوژی	LD	LU/LC	DD	خاک	شیب	وزن نرمال شده
بارندگی	1	3	4	5	6	6	7	40%
لیتولوژی	1/3	1	2	3	4	5	6	19%
LD	1/4	1/2	1	2	3	4	5	15%
LU/LC	1/5	1/3	1/2	1	2	3	4	9%
DD	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	8%
خاک	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	6%
شیب	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	3%

جدول ۳: وزن نهایی معیارهای مورد استفاده در مدل AHP

پارامتر	وزن نرمال شده
بارندگی	40%
لیتولوژی	19%
تراکم شکستگی‌های خطی	15%
استفاده و پوشش اراضی	9%

تراکم زهکشی	8%
نوع خاک	6%
شیب	3%

بارندگی با وزن ۴۰ درصد بیشترین اهمیت را در میان عوامل مورد بررسی به خود اختصاص داد. این موضوع بیانگر وابستگی مستقیم تغذیه اکوفایری ولایت ننگرهار به بارندگی و نفوذ آب حاصل از آن است. لیتولوژی با وزن ۱۹ درصد و تراکم شکستگی های خطی با وزن ۱۵ درصد در رتبه های بعدی قرار گرفتند که نشان دهنده نقش قابل توجه شرایط زمین شناسی و ساختاری منطقه در کنترل ذخیره و انتقال آب های زیرزمینی می باشد. در مقابل، شیب با وزن ۳ درصد کمترین تأثیر را در مقایسه با سایر عوامل نشان داد.

جدول ۳: مقادیر شاخص تصادفی^{۴۴}

تعداد معیارها	RI
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45

ارزیابی سازگاری ماتریس مقایسه زوجی

یکی از مهم ترین خصوصیات روش پروسه تحلیل سلسله مراتبی امکان بررسی میزان سازگاری یا ثبات قضاوت های انجام شده در ماتریس مقایسه زوجی است. برای این منظور از نسبت سازگاری^{۴۵} استفاده می شود.

فرمول محاسبه نسبت سازگاری به صورت زیر است:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

که در آن:

^{۴۴} Random index-RI

^{۴۵} Consistency Ratio

نسبت سازگاری = CR

شاخص سازگاری = CI

شاخص تصادفی = RI

همچنین شاخص سازگاری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1}$$

که در آن:

$\lambda_{\max}$ = بزرگ‌ترین مقدار خاص ماتریس

n = تعداد معیارها (SAATY, 1987).

برای اطمینان از درست بودن مقایسه‌های انجام شده بین معیارها، میزان سازگاری ماتریکس مقایسه زوجی با استفاده از نسبت سازگاری بررسی گردید. در این تحقیق، تعداد معیارهای مورد بررسی ۷ معیار بوده است؛ بنابراین مقدار شاخص تصادفی مطابق روش (SAATY, 1987) برابر با 1.32 در نظر گرفته شد. بزرگ‌ترین مقدار ماتریکس ($\lambda_{\max}$) برابر با 7.32 محاسبه شد. بعداً شاخص سازگاری از رابطه زیر محاسبه شد:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

با قرار دادن مقادیر:

$$CI = (7.32 - 7) / (7 - 1)$$

$$CI = 0.32 / 6$$

$$CI = 0.053$$

سپس، نسبت سازگاری از رابطه زیر به دست آمد:

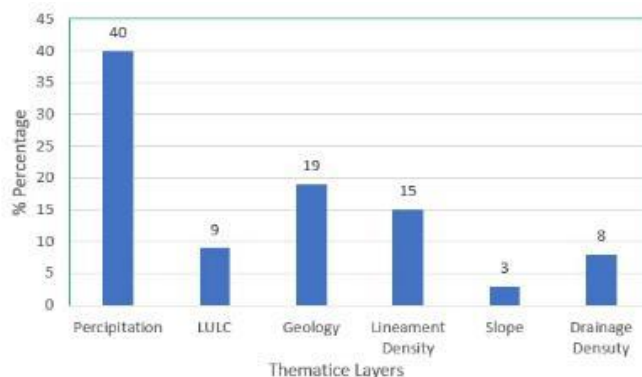
$$CR = CI / RI$$

$$CR = 0.053 / 1.32 = 0.040$$

مقدار نهایی نسبت سازگاری برابر با ۰,۰۴۰ به دست آمد که کمتر از مقدار قابل قبول 0.10 می‌باشد.

روش تحلیل حساسیت وزن‌های AHP

برای ارزیابی تأثیر تغییرات وزن معیارها بر نتایج مدل AHP، تحلیل حساسیت وزنی انجام شد. ۳ سناریوی مختلف با تغییر محدود وزن معیارهای دارای بیشترین تأثیر (بارندگی، لیتولوژی و تراکم شکستگی‌های خطی) طراحی و نقشه‌های ظرفیت آب زیرزمینی مجدداً تهیه گردید. پایداری نتایج بر اساس تغییرات طبقات ظرفیت و میزان جابه‌جایی مکانی طبقات ارزیابی شد.



شکل ۱۰: وزن نرمال‌شده پارامترهای مؤثر بر ظرفیت آب زیرزمینی

شکل ۱۰ وزن نرمال هر پارامتر به اساس موثریت بر ظرفیت آب زیرزمینی را نشان می‌دهد که در این تحقیق دریافت گردیده و به اساس آن لایر بندی و طبقه بندی لایر ها در محیط ArcGIS با استفاده از جدول ذیل نقشه GPZ ولایت مذکور را می‌سازیم:

جدول ۴: وزن نرمال‌شده پارامترها و رتبه‌بندی زیرطبقات

شماره	طبقات	وزن	طبقات	رتبه
۱	بارندگی	40%	357-464	1
			464-528	3
			528-600	5
			600-684	7
			684-841	9
۲	استفاده از زمین	9%	آب	9
			درختان	7
			پوشش نباتی آبی	3
			زراعت	7
			مناطق ساخته شده	1
			اراضی بایر و خشک	5
			برف و یخ	9

9	ابر			
5	چراگاه			
9	رودخانه	19%	لیتولوژی	۳
7	روسبات سنگ بازلتی			
7	سنگ‌های رسوبی درشت‌دانه			
5	رسوبات مختلط			
5	سنگ‌های کربناتی			
3	رسوبات رسی			
1	سنگ‌های ناریه			
1	سنگ‌های گرانیتی			
1	سنگ‌های میتمورفیک			
1	0.02-0.12	15%	تراکم شکستگی‌های خطی	۴
3	0.12-0.16			
5	0.16-0.20			
7	0.20-0.26			
9	0.26-0.44			
9	0-5	3%	شیب	۵
7	5-15			
5	15-25			
3	25-40			
1	40-60			
9	خیلی کم	8%	تراکم زهکشی	۶
7	کم			
5	متوسط			
3	زیاد			
1	خیلی زیاد			
9	ریگی-لوم ^{۴۶}	6%	نوع خاک	۷
7	کلی-ریگی-لوم ^{۴۷}			
5	لوم ^{۴۸}			

^{۴۶} Sandy Loam

^{۴۷} Sandy Clay Loam

^{۴۸} Loam

پس از تعیین وزن نهایی معیارها و رتبه‌بندی طبقات فرعی، تمامی لایه‌های موضوعی در محیط GIS دوباره طبقه‌بندی و استانداردسازی شدند. سپس با استفاده از روش همپوشانی وزنی، نقشه نهایی ظرفیت آب‌های زیرزمینی تهیه گردید. فرمول تحلیل همپوشانی وزنی به صورت زیر است:

$$GPZM = \sum n(W_i \times X_i)$$

که در آن:

نقشه ظرفیت آب زیرزمینی = GPZM

وزن نرمال شده هر معیار = W_i

رتبه اختصاص داده شده به هر زیرطبقه = X_i

تعداد کل لایه‌های موضوعی = n

ظرفیت آب‌های زیرزمینی^{۵۰}

پس از تعیین وزن نهایی معیارها با استفاده از روش AHP و انجام تحلیل همپوشانی وزنی در محیط GIS، نقشه نهایی ظرفیت آب‌های زیرزمینی برای ولایت ننگرهار تهیه گردید. بر اساس نتایج حاصل، ساحه مورد مطالعه به پنج طبقه شامل بسیار ضعیف^{۵۱}، ضعیف^{۵۲}، متوسط^{۵۳}، زیاد^{۵۴} و بسیار زیاد^{۵۵} تقسیم‌بندی شد. نتایج نشان می‌دهد که طبقه «متوسط» با مساحت ۲۹۰۷,۳۵ کیلومتر مربع، معادل ۳۹,۷۱ درصد از کل منطقه، بیشترین سهم را به خود اختصاص داده است. این موضوع بیان می‌کنند که بخش مهم از ولایت ننگرهار دارای شرایط نسبتاً مناسب برای ذخیره و تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌باشد. طبقات «زیاد» و «بسیار زیاد» هر کدام حدود ۱۹,۵۶ درصد از مساحت منطقه را پوشش می‌دهند. این نواحی عمدتاً در بخش‌های جنوبی، جنوب شرقی و برخی مناطق مرکزی ولایت واقع شده‌اند و به دلیل وجود رسوبات رودخانه‌یی، شیب کم، نفوذپذیری مناسب خاک و تراکم نسبتاً بالای

^{۴۹} Clay Loam

^{۵۰} Groundwater Potential Zones- GPZ

^{۵۱} Very Poor

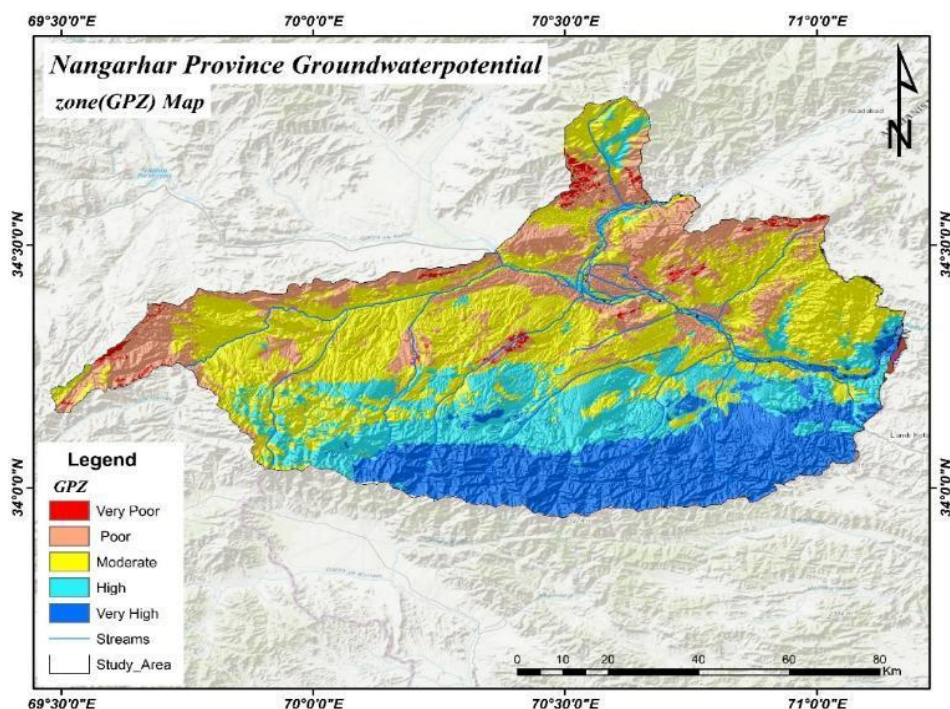
^{۵۲} Poor

^{۵۳} Moderate

^{۵۴} High

^{۵۵} Very High

شکستگی‌های جیولوجیکی، شرایط بهتری برای نفوذ و ذخیره آب‌های زیرزمینی دارند. ولسوالی‌های رودات، بهسود، بتی‌کوت، کامه و بخش‌هایی از اچین، شینوار و مهمندره در این طبقات قرار می‌گیرند. طبقه «ضعیف» حدود ۲۰,۰۳ درصد از مساحت منطقه را تشکیل می‌دهد. این مناطق عمدتاً در نواحی دارای نفوذپذیری کمتر، شیب نسبتاً زیاد و یا سازندهای جیولوجیکی نامناسب واقع شده‌اند که ظرفیت ذخیره آب زیرزمینی در آن‌ها محدودتر است. طبقه «بسیار ضعیف» تنها ۱,۱۴ درصد از



مساحت منطقه را شامل می‌شود و بیشتر در مناطق کوهستانی و مرتفع شمالی و شمال شرقی ولایت مشاهده می‌گردد. ولسوالی‌های دره‌نور، کوزکنر و بخش‌هایی از حصارک و لعل‌پور بیشتر در این طبقه قرار دارند. در این مناطق به دلیل شیب زیاد، افزایش رواناب سطحی و کاهش نفوذ آب، ظرفیت آب‌های زیرزمینی پایین می‌باشد. به‌طور کلی، تحلیل مکانی نقشه حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که نواحی هموار و رودخانه‌یی نزدیک به رودخانه‌های کابل، کنر و سرخورد دارای بیشترین ظرفیت آب زیرزمینی بوده، در حالی که مناطق کوهستانی شمالی و شرقی دارای کمترین ظرفیت می‌باشند.

شکل ۱۱: نقشه نهایی ظرفیت آب‌های زیرزمینی ولایت ننگرهار

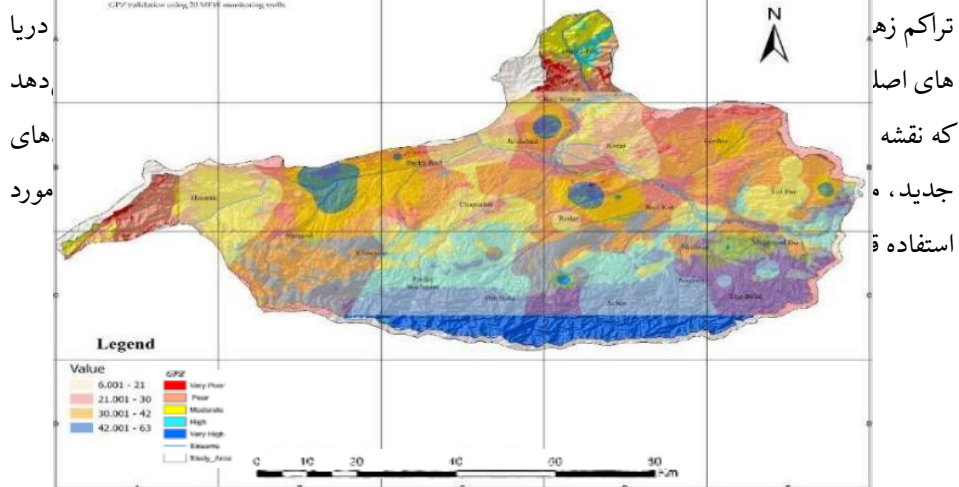
جدول ۵: مساحت و درصد طبقات ظرفیت آب زیرزمینی

طبقه پتانسیل	مساحت (km ²)	درصد (%)
--------------	--------------------------	----------

1.14	83.44	بسیار ضعیف
20.03	1466.77	ضعیف
39.71	2907.35	متوسط
19.56	1432.36	زیاد
19.56	1432.24	بسیار زیاد

اعتبارسنجی نواحی های ظرفیت آب زیرزمینی^{۵۶}

برای ارزیابی دقت نقشه ظرفیت آب های زیرزمینی تهیه شده با استفاده از روش AHP و GIS، اعتبارسنجی نتایج با استفاده از اطلاعات ۲۰ حلقه چاه مشاهده ای مربوط وزارت انرژی و آب افغانستان در ولایت ننگرهار به دلیل اعتبار بخشیدن به دقت اطلاعات ریموت سنسنگ یا سنجش از دور که نقشه نهایی ظرفیت آب زیرزمینی از آن تهیه شده، انجام گردید. موقعیت مکانی چاه ها بر روی نقشه نهایی ظرفیت آب زیرزمینی تطبیق داده شد تا میزان همخوانی میان زون های پیش بینی شده و وضعیت واقعی منابع آب زیرزمینی بررسی گردد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که از ۲۰ چاه، ۱۶ چاه (۸۰٪) در طبقات منطبق با نقشه قرار داشتند: ۷ چاه در زون های "زیاد" و "بسیار زیاد"، ۶ چاه در زون "متوسط"، و ۳ چاه در زون های "ضعیف" و "بسیار ضعیف". همچنان مشاهده گردید که چاه های واقع شده در بخش های شمالی و شمال شرقی ولایت، به خصوص در نواحی کوهستانی، بیشتر در زون های «ضعیف» و «بسیار ضعیف» قرار داشته اند که با مبهم تر شدن ارتباط با منطقه شامل شناسایی سلسله های کوهستانی و



⁵⁶ Validation of Groundwater Potential Zones- GPZ

بحث و مناقشه^{۵۷}

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که توزیع مکانی ظرفیت آب‌های زیرزمینی در ولایت ننگرهار تحت تأثیر ترکیب مغلق از عوامل اقلیمی، جیولوجیکی، توپوگرافی و استفاده زمین قرار دارد. تحلیل مبتنی بر پروسه تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داد که بارندگی با وزن ۴۰ درصد مهم‌ترین عامل مؤثر بر تغذیه اکوفایر بوده و نقش اساسی در تشکیل زون‌های با ظرفیت بالا ایفا می‌کند. این یافته با مطالعات قبلی در مناطق نیمه‌خشک همخوانی داشته، بارندگی را عامل اصلی تغذیه طبیعی اکوفایر معرفی نموده‌اند (Agarwal et al., 2013; Beden et al., 2023). در ولایت ننگرهار، بارندگی به دلیل شرایط اقلیمی نیمه‌خشک منطقه نقش اساسی در تغذیه طبیعی اکوفایر دارد. با توجه به اینکه منابع آب سطحی در بسیاری از مناطق وابسته به جریان‌های فصلی می‌باشند، نفوذ مستقیم بارندگی یکی از مهم‌ترین منابع تجدید آب زیرزمینی محسوب می‌شود؛ به همین دلیل در مدل AHP بالاترین وزن به این عامل اختصاص داده شد. وزن پایین شیب (۳٪) به این معنا نیست که میل فاقد اهمیت هایدرولوجیکی است، بلکه نشان‌دهنده اهمیت نسبی آن در مقایسه با سایر عوامل می‌باشد. در ننگرهار، بخش عمده مناطق دارای ظرفیت بالای آب زیرزمینی در دشت جلال‌آباد و مناطق دریایی واقع شده‌اند که تفاوت شیب در آن‌ها محدود است؛ بنابراین اثر شیب نسبت به لیتولوژی و بارندگی کمتر مشاهده گردید. تفاوت اصلی ننگرهار با بسیاری از مناطق مطالعاتی دیگر افغانستان درموجودیت دشت وسیع رودخانه‌ی جلال‌آباد، دریا‌های کابل-کنر و رسوبات ضخیم دریایی می‌باشد که شرایط مناسبی برای ذخیره آب زیرزمینی ایجاد کرده است. همچنان نقش لیتولوژی (۱۹٪) و تراکم شکستگی‌های خطی (۱۵٪) نشان می‌دهد که شرایط ساختاری و زمین‌شناسی ولایت ننگرهار تأثیر مستقیم بر ذخیره و انتقال آب‌های زیرزمینی دارد. مناطق دارای رسوبات دریایی، جغلی و ریگی به دلیل نفوذپذیری بالا، ظرفیت مناسب‌تر برای ذخیره آب زیرزمینی داشته‌ه‌د، بیشتر قضا با ناهماهنگی ظرفیت، ناهمبستگی و ناهمبستگی دارند. یافته‌ها با شکل ۱۲: اعتبارسنجی زون‌های ظرفیت آب زیرزمینی (GPZ) با استفاده از ۲۰ حلقه چاه مشاهده‌ای

نتایج مطالعات ارکوپروفا و همکاران (۲۰۱۲)^{۵۸}، مطابقت دارد. از نظر موقعیت جغرافیایی، نواحی جنوبی، جنوب شرقی و بخش هایی از مرکز ولایت شامل ولسوالی های رودات، بهسود، بتی کوت، کامه، بخش هایی از اچین، شینوار، مهمندره و اطراف جلال آباد عمدتاً در نواحی «زیاد» و «بسیار زیاد» قرار گرفته اند. این مناطق به دلیل وجود دشت های دریایی، شیب نسبتاً کم، تراکم زهکشی پایین، خاک های نفوذپذیر و نزدیکی به مسیر دریایی کابل، کتر و سرخورد دارای شرایط مساعد برای تغذیه آب زیرزمینی می باشند. در مقابل، زون های «ضعیف» و «بسیار ضعیف» بیشتر در نواحی شمالی و شمال شرقی ولایت، از جمله بخش هایی از دره نور، کوزکتر، حصارک و لعل پور دیده شد. این نواحی عمدتاً دارای شیب های تند، ساختارهای سخت سنگی، تراکم زهکشی نسبتاً بالا و نفوذپذیری پایین بوده که باعث کاهش فرصت نفوذ آب و افزایش رواناب سطحی می شود. همچنان نقش استفاده زمین نشان داد که مناطق زراعتی و دارای پوشش نباتی، شرایط مناسب تری برای نفوذ آب فراهم نموده و نسبت به مناطق ساخته شده شهری از ظرفیت بالاتری برخوردارند. در مناطق شهری مانند اطراف جلال آباد، افزایش سطوح غیرقابل نفوذ مانند ساختمان ها، سرک ها و کوچه های کانکریتی سبب کاهش نفوذ و افزایش رواناب می شود (Machiwal et al., 2011). برای ارزیابی عملکرد نقشه نهایی ظرفیت آب زیرزمینی، از اطلاعات ۲۰ حلقه چاه مشاهده ای وزارت انرژی و آب استفاده شد. معیار اعتبارسنجی، عمق سطح آب^{۵۹} بود که بر اساس مطالعات و شرایط هایدروجیولوژیکی منطقه ننگرهار انتخاب گردید. در این مطالعه، عمق کمتر از ۱۵ متر به عنوان شاخص تغذیه مناسب و نفوذپذیری بالا (ظرفیت زیاد)، عمق ۱۵ تا ۳۰ متر به عنوان شرایط متوسط، و عمق بیشتر از ۳۰ متر به عنوان شاخص تغذیه محدود و نفوذپذیری پایین (ظرفیت کم) در نظر گرفته شد. سپس موقعیت مکانی چاه ها با طبقات نقشه ظرفیت آب زیرزمینی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که از مجموع ۲۰ حلقه چاه، ۱۶ حلقه (۸۰٪) با طبقات پیش بینی شده نقشه مطابقت داشتند؛ به گونه ای که ۷ چاه در زون های «زیاد» و «بسیار زیاد»، ۶ چاه در زون «متوسط» و ۳ چاه در زون های «ضعیف» و «بسیار ضعیف» قرار گرفتند. این میزان تطابق نشان دهنده عملکرد قابل قبول مدل AHP در شناسایی الگوهای مکانی ظرفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه می باشد. با وجود استفاده از اطلاعات مکانی معتبر و روش های استاندارد GIS و AHP، نتایج این مطالعه دارای برخی منابع عدم قطعیت می باشد. مهم ترین منابع عدم قطعیت شامل تفاوت مقیاس مکانی دیتا ها، دقت لایه های ورودی، محدودیت اطلاعات هایدروجیولوژیکی و وابستگی وزن دهی AHP به

^{۵۸} Arkoprovo

^{۵۹} Water table depth

اهمیت نسبی معیارها می‌باشد. همچنین، کیفیت نقشه نهایی به دقت داده‌های دیم، بارندگی، زمین‌شناسی و اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای وابسته است. بنابراین، نتایج این تحقیق باید به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد و نه جایگزین بررسی‌های تفصیلی ساحوی. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سیستم آب زیرزمینی ولایت ننگرهار از نظر مکانی و مقدار متغیر بوده و مدیریت پایدار آن نیازمند توجه خاص به تفاوت‌های مکانی در ظرفیت اکوفایر است.

تحلیل حساسیت وزن‌های AHP

برای تحلیل حساسیت، ۳ سناریوی وزنی طراحی شد که در زیر بحث شده است:

- سناریوی ۱ (اصلی): وزن بارندگی ۴۰٪، لیتولوژی ۱۹٪، تراکم شکستگی‌های خطی ۱۵٪، کاربری/پوشش زمین ۹٪، تراکم زهکشی ۸٪، خاک ۶٪ و شیب ۳٪ در نظر گرفته شد. این سناریو به‌عنوان نقشه مرجع ظرفیت آب زیرزمینی استفاده گردید.
- سناریوی ۲: وزن بارندگی از ۴۰٪ به ۳۵٪ کاهش و وزن لیتولوژی از ۱۹٪ به ۲۵٪ افزایش داده شد؛ وزن تراکم شکستگی‌های خطی ۱۵٪، پوشش زمین برابر ۹٪، تراکم زهکشی ۸٪، خاک ۵٪ و شیب ۳٪ در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که طبقات «زیاد» و «بسیار زیاد» بدون تغییر باقی ماندند و تغییرات عمدتاً در طبقه «متوسط» مشاهده شد.
- سناریوی ۳: وزن بارندگی به ۴۵٪ افزایش و وزن لیتولوژی به ۱۵٪ کاهش داده شد؛ در حالی که وزن تراکم شکستگی‌های خطی ۱۵٪، پوشش زمین برابر ۹٪، تراکم زهکشی ۸٪، خاک ۵٪ و شیب ۳٪ ثابت نگه داشته شد. نتایج نشان داد که نمونه مکانی مناطق دارای ظرفیت «زیاد» و «بسیار زیاد» ثابت باقی ماند و تغییرات طبقه «متوسط» در حدود ۵,۲ تا ۸,۷٪ بود که تأثیر مهمی بر نتیجه نهایی نداشت.

محدودیت‌های تحقیق

با وجود نتایج قابل قبول، این مطالعه دارای برخی محدودیت‌ها می‌باشد. نخست، اعتبارسنجی نقشه ظرفیت آب زیرزمینی بر اساس ۲۰ حلقه چاه مشاهده‌ای وزارت انرژی و آب انجام گردید و افزایش تعداد نقاط کنترولی از طرف نهاد‌های مربوط می‌تواند دقت ارزیابی مدل را افزایش دهد. دوم، تفاوت در مقیاس مکانی و زمانی برخی اطلاعات ورودی مانند بارندگی، دیم، زمین‌شناسی، خاک و پوشش زمین می‌تواند بر نتایج تأثیرگذار باشد. سوم، روش AHP وابسته به اهمیت نسبی معیارها بوده و

تغییر وزن‌ها می‌تواند بر طبقه‌بندی نهایی اثر بگذارد. همچنین، نبود برخی اطلاعات تفصیلی هایدروجیولوژیکی مانند هدایت هایدرولیکی و تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی از دیگر محدودیت‌های این تحقیق محسوب می‌شود. بنابراین، نتایج این مطالعه به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری منطقه‌ای قابل استفاده بوده و نیازمند مطالعات تفصیلی ساحوی برای پروژه‌های بزرگ آبی در آینده می‌باشد. همچنین در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود ارزیابی همزمان کمیت و کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌هایی مانند دراستیک^{۶۰}، شاخص کیفیت آب^{۶۱} و سایر روش‌های جدید انجام گردد تا مناطق دارای خطر آلودگی و کاهش منابع آب نیز مشخص شوند.

نتیجه‌گیری

این تحقیق با استفاده از سنجش از دور، سیستم معلومات جغرافیایی و AHP، ظرفیت آب‌های زیرزمینی ولایت ننگرهار را ارزیابی و طبقه‌بندی نمود. نتایج نشان داد که توزیع مکانی آب زیرزمینی در ولایت ننگرهار بسیار متغیر بوده و به شدت تحت تأثیر بارندگی، لیتولوژی، تراکم شکستگی‌های خطی، استفاده زمین، خاک، تراکم زهکشی و شیب قرار دارد. بر اساس یافته‌ها، حدود ۱۹,۵۶ درصد منطقه در زون «بسیار زیاد»، ۱۹,۵۶ درصد در زون «زیاد»، ۳۹,۷۱ درصد در زون «متوسط» و ۲۰,۳۰ درصد در زون «ضعیف» و ۱,۱۴ درصد در زون «بسیار ضعیف» قرار گرفته است. زون‌های ظرفیت بالا و بسیار بالا عمدتاً در بخش‌های جنوبی، جنوب‌شرقی و برخی نواحی مرکزی ولایت شامل ولسوالی‌های رودات، بهسود، بتی‌کوت، کامه، بخش‌هایی از اچین، شینوار، مهمندره و اطراف جلال‌آباد متمرکز می‌باشند. این مناطق به دلیل وجود رسوبات دریایی، نفوذپذیری مناسب خاک، شیب کم و نزدیکی به دریاها دارای شرایط بهتر برای تغذیه و ذخیره آب زیرزمینی هستند. بنابراین، این نواحی می‌توانند به‌عنوان مناطق اولیه برای حفر چاه‌های جدید، توسعه سیستم‌های آبیاری و مدیریت مستمر منابع آب در نظر گرفته شوند همچنان مناطق کمتر آسیب‌پذیر از لحاظ ته‌نشین شدن مواد آفت‌کش‌های زراعتی کمتر آلوده می‌باشد. در مقابل، زون‌های «ضعیف» و «بسیار ضعیف» بیشتر در بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی ولایت شامل دره‌نور، کوزکنر، حصارک، لعل‌پور و برخی مناطق کوهستانی اطراف مشاهده گردید که هم در اوقات کم آبی سبب عدم دسترسی مردم به آب و هم از نظر مدل درستی‌ک این مناطق در خطر احتمالی آلودگی به دلیل استفاده کودهای کیمیاوی و آفت‌کش‌ها می‌گردد. این مناطق به دلیل شیب زیاد، ساختارهای سخت‌سنگی، تراکم زهکشی بالا و نفوذپذیری

^{۶۰} DRASTIC

^{۶۱} Water quality index

پایین، ظرفیت محدودی برای تغذیه و ذخیره آب زیرزمینی دارند و برای توسعه منابع آب زیرزمینی از اولویت پایین‌تری برخوردار می‌باشند. همچنان اعتبارسنجی نتایج با استفاده از ۲۰ حلقه چاه مشاهده‌ای وزارت انرژی و آب نشان داد که مدل توسعه یافته از دقت مناسب برخوردار بوده و توانایی قابل قبولی در شناسایی زون‌های ظرفیت آب زیرزمینی دارد. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که تغییرات محدود در وزن معیارهای اصلی، به‌ویژه بارندگی و لیتولوژی، تأثیر مهم بر الگوی کلی نقشه ظرفیت آب زیرزمینی نداشته و زون‌های «زیاد» و «بسیار زیاد» در تمامی سناریوها پایدار باقی ماندند. این مطالعه با وجود ارائه نقشه ظرفیت آب زیرزمینی ولایت ننگرهار، دارای محدودیت‌هایی هم می‌باشد. نخست، تعداد چاه‌های مشاهده‌ای مورد استفاده برای اعتبارسنجی محدود بوده و افزایش تعداد نقاط کنترل می‌تواند دقت ارزیابی را افزایش دهد. دوم، برخی داده‌های مکانی مانند زمین‌شناسی و بارندگی دارای تفاوت در مقیاس فضایی بوده که ممکن است بر نتایج نهایی اثر بگذارد. سوم، روش AHP تا حدی وابسته به قضاوت متخصصین و اهمیت نسبی معیارها می‌باشد. بنابراین، مطالعات آینده می‌تواند با استفاده از اطلاعات هایدروجیولوژیکی بیشتر و تحلیل‌های زمانی، دقت پیش‌بینی ظرفیت آب زیرزمینی را افزایش دهد. در نهایت، این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب GIS، سنجش از دور و مدل AHP می‌تواند ابزار مؤثری برای برنامه‌ریزی، مدیریت و حفاظت پایدار منابع آب زیرزمینی در ولایت ننگرهار شود. نتایج حاصله می‌تواند در مکان‌یابی چاه‌های جدید، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی توسعه‌ای این ولایت، سایر مناطق دارای کمبود اطلاعات هایدروژئولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد. از دیگر دستاوردهای اصلی این تحقیق ایجاد یک چارچوب یکپارچه RS-GIS-AHP برای شناسایی مناطق دارای ظرفیت آب زیرزمینی در ولایت ننگرهار می‌باشد. این چارچوب می‌تواند در شرایط کمبود اطلاعات هایدروژئولوژیکی، به‌عنوان وسیله حمایتی برای تصمیم‌گیری نهادهای مدیریت آب، کاهش هزینه‌های اکتشاف منابع آب و اولویت‌بندی مناطق مناسب برای مطالعات تفصیلی مورد استفاده قرار گیرد. همچنان مدل‌های آسیب‌پذیری مانند مدل درستیک، شاخص کیفیت آب و سایر پارمترهای که آلودگی آب‌های زیرزمینی را شناسایی، به دلیل زمین‌های زراعتی موجود در این منطقه در تحقیقات بعدی اضافه نمود. همچنان پیشنهاد می‌شود که تعداد حلقه‌های چاه‌های تحقیقاتی وزارت مربوطه افزایش یابد برای تحقیقات بیشتر بخصوص برای دریافت کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی این ولایت.

سیاسگزاری

بدین وسیله از وزارت انرژی و آب افغانستان به خاطر فراهم سازی اطلاعات مربوط به ۲۰ چاه های مشاهده ای مورد استفاده در اعتبارسنجی نقشه ظرفیت آب های زیرزمینی و سایر نهادها، منابع علمی و داده ای که اطلاعات مکانی مورد نیاز این تحقیق، از جمله اطلاعات بارندگی، مدل ارتفاع دیجیتلی، خاک، لیتولوژی و استفاده و پوشش زمین را فراهم نموده اند، قدردانی می شود. دسترسی به این اطلاعات زمینه انجام تحلیل های سنجش از دور، سیستم معلومات جغرافیایی و مدل AHP و تهیه نقشه ظرفیت آب های زیرزمینی ولایت ننگرهار را فراهم ساخت.

سهم نویسندگان

سید محمد تمیم هاشمی مسئولیت اصلی تدوین، تنظیم و نگارش نهایی مقاله، آماده سازی و سازماندهی پارامترهای تحقیق، تحلیل و یکپارچه سازی داده ها، تهیه و تنظیم نقشه های نهایی و هماهنگی کلی مراحل تحقیق را بر عهده داشته است. ثانیاً، پوهندوی دکتور لطف الله صافی در طراحی چارچوب تحقیق، جمع آوری داده های مربوط به استفاده و پوشش زمین و تهیه و تنظیم نقشه ها؛ محمد رفیق منگل در جمع آوری و آماده سازی داده های مربوط به شیب و لیتولوژی و بازنویسی و پارافریز متن مقاله همکاری کرده است و محمد حامد حقل در جمع آوری داده های مورد نیاز از وزارت انرژی و آب و همکاری در تهیه و تنظیم نقشه های تحقیق سهم داشته اند.

تضاد منافع

در ارتباط با این تحقیق هیچ گونه تضاد منافع مالی، شخصی، علمی یا سازمانی وجود ندارد و نتایج تحقیق بدون تأثیرپذیری از منافع شخصی یا گروهی ذکر شده است.

منابع

- Agarwal, E., Agarwal, R., Garg, R. D., & Garg, P. K. (2013). *Delineation of groundwater potential zone : An AHP / ANP approach*. 3, 887–898.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12040-013-0309-8>
- Arkoprovo, B., Adarsa, J., & Prakash, S. S. (2012). *Delineation of Groundwater Potential Zones using Satellite Remote Sensing and Geographic Information System Techniques : A Case study from Ganjam district , Orissa , India*. 1(9), 59–66. [Link](#)
- Beden, N., Soydan-oksall, N. G., & Arıman, S. (2023). *Delineation of a Groundwater Potential Zone Map for the Kızılırmak Delta by Using Remote-Sensing-Based Geospatial and Analytical Hierarchy Processes*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su151410964>
- Elango, S. P. R. K. B. L. (2017). Geological and geomorphological controls on groundwater occurrence in a hard rock region. *Applied Water Science*, 7(3), 1377–1389. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0327-6>
- Elmahdy, S. I., & Mohamed, M. M. (2013). Groundwater potential modelling using remote sensing and GIS: a case study of the Al Dhaid area, United Arab Emirates. *Geocarto International*, June 2013, 37–41.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2013.784366>
- Farahmand, A., Zaryab, A., Ameri, N., Ali, S., & Eqrar, M. N. (2025). Highlights : *Journal of Trace Elements and Minerals*, 100232.
<https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2025.100232>
- GESIM Nasir Ahmad, T. O. (2018). *GIS based groundwater potential mapping using Frequency Ratio and Shannon' s Entropy models in Herat city, Afghanistan* GESIM Nasir Ahmad. Takeo Okazaki. 90–93.
- Halder, S., Biswas, M., Kumar, P., & Sedighi, M. (2023). Catena Groundwater vulnerability assessment for drinking water suitability using Fuzzy Shannon Entropy model in a semi-arid river basin. *Catena*, 229(February), 107206.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107206>
- Hayat, E., & Baba, A. (2017). *Quality of groundwater resources in Afghanistan*. September 2016. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6032-1>
- Jahish, H., Sarwary, M. H., Rasoli, Z., Kaiwaan, A., Naimzad, M. A., Namdar, A., &

- Azimi, S. J. (2024). *Groundwater Pollution Vulnerability in Kabul, Afghanistan* (Vol.25). [Link](#)
- Jamali, M. Y., & Tallou, A. (2020). *Estimation of groundwater vulnerability to pollution based on DRASTIC and SI methods : a case study of the irrigated area of Tadla plain , Oum Errabia Basin , Morocco*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1145/3399205.3399223>
- Machiwal, D., Jha, M. K., & Mal, B. C. (2011). *Assessment of Groundwater Potential in a Semi-Arid Region of India Using Remote Sensing , GIS and MCDM Techniques*. 1359–1386. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9749-y>
- MAIL. (2025). *Apple yield in Nangarhar reached 2,214 metric tons; a five percent increase compared to last year*. Ministry of Irrigation, Agriculture and Livestock.; Ministry of irrigation, agriculture and livestock. [Link](#)
- Mercy Corps'. (2025). *K ABUL ' S WATER CRISIS An Inflection Point for Action*. April. [Link](#)
- MEW. (2022). *Groundwater wells in Nangarhar Province under review*. [Link](#)
- Mihran, R. (2011). *Rural Community Vulnerability to Food Security Impacts of Climate Change in Afghanistan Evidence from Balkh , Herat , and Nangarhar Provinces*.
<https://dspacemainprd01.lib.uwaterloo.ca/server/api/core/bitstreams/d5294fbb-c41e-4ee9-a57d-1cb1c8679e0f/content>
- National Water Affairs Regulation Authority (NWARA). (2019). *Groundwater Resources Balance Report of Nangarhar Province [Unpublished technical report]*. Ministry of Energy and Water, Afghanistan.
- NSIA. (2024). *Statistical Yearbook 2023-24. September*. <https://nsia.gov.af:8443/wp-content/uploads/2024/07/Fuorth-Quarter-1402.pdf>
- Popalzai, A., Ahmadi, H., Rahmani, A. B., & Pekkan, E. (2023). *Delineation of groundwater potential zones using multi-criteria decision analysis: The case of Balkh Province, Northern Afghanistan*. *Proceedings*, 87(1), 41.
<https://doi.org/10.3390/IECG2022-14817>
- Pathmanandakumar, V., & Thasarathan, N. (2021). *An Approach to Delineate Potential Groundwater Zones in Kilinochchi District , Sri Lanka , Using GIS Techniques*.
<https://doi.org/10.3390/ijgi10110730>
- Pholkern, K., Saraphirom, P., & Srisuk, K. (2018). *Science of the Total Environment Potential impact of climate change on groundwater resources in the Central Huai Luang Basin , Northeast Thailand*. *Science of the Total Environment*, 633, 1518–1535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.300>
- Rasoli, Z., Kaiwaan, A., Naimzad, A., & Namdar, A. (2025). *Groundwater Pollution Vulnerability in Kabul, Afghanistan, Assessed Using a Geographical Information System (GIS)-Based DRASTIC Model*. January. [Link](#)
- RRERS. (2006). *Provincial profile for - Nangarhar - . Rural, Regional Regeneration*,

- Economic*, 1–10.
https://www.ecoi.net/en/file/local/1048565/1222_1197554805_nangarhar-provincial-profile.pdf
- SAATY, R. W. (1987). *THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS-WHAT AND HOW IT IS USED*. 9(3), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Santra, A., & Bhowmick, S. (n.d.). *Groundwater Depletion in a Changing Climate : Risks , Challenges , and Pathways to Sustainability*. 41–51. <https://doi.org/10.65525/SVUP.9788199956070.2026.41-51>
- Seyam, M., Alagha, J. S., Abunama, T., Mogheir, Y., Affam, A. C., Heydari, M., & Ramlawi, K. (2020). Investigation of the influence of excess pumping on groundwater salinity in the Gaza Coastal Aquifer (Palestine) using three predicted future scenarios. *Water*, 12(8), 2218. <https://doi.org/10.3390/w12082218>
- Shekhar, S., & Pandey, A. C. (2015). Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain of India using remote sensing, geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques. *Geocarto International*, 30(4), 402–421. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.894584>
- Sinan, M., & Razack, M. (2009). An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco). *Environmental Geology*, 57(2), 349–363. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1304-2>
- Shekhar, S., & Pandey, A. C. (2015). Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain of India using remote sensing, geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques. *Geocarto International*, 30(4), 402–421. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.8945>
- Tani, H., & Tayfur, G. (2021). Groundwater for Sustainable Development Identification of groundwater potential zones in Kabul River. *Groundwater for Sustainable Development*, 15(August), 100666. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100666>
- USAID. (2021). *Water Resources Profile Series: Afghanistan Water Resources Profile Overview*. 1–8 [Link](#)
- U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *Nitrate and pesticides in shallow ground water in agricultural watersheds*. [Link](#)