https://jsras.rcc.edu.ly/
Vol.3 No.2 (2026), 167-179
Article history:
Received: 10 Aug .2026
Accepted: 4.Sep . 2026
Published: 1 Oct .2026

Journal of Sustainable Research in Applied Sciences

Assessment of Surface Water Impacts on Railway Infrastructure Stability and Drainage System Efficiency: An Analytical and Applied Study of the Al-Khums–Kaam Railway Line, Libya

Fuad Salem Al-Qahwaji [1*]، Abdulbasit Ahmed Abdulsamad [2] ، Hayat Hosni Shalfit[3]
[1.2 3]. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Al-Murqab University, Al-Khums, Libya
, hayathosny2001@gmail.com aaabdolssamed@elmergib.edu.ly
* Fuad Salem Al-Qahwaji

keywords
Surface Water; Railway Infrastructure; Drainage Systems; Geotechnical Stability; Al-Khums–Kaam Railway Line

Abstract
Railway infrastructure is a fundamental component of economic development and sustainable transportation. However, exposure to surface water poses significant engineering challenges that may compromise track stability and operational efficiency. The research problem concerns the potential deterioration of subgrade soils and ballast layers due to rainwater accumulation and inadequate drainage, resulting in settlement, erosion, and structural deformation. This study aimed to assess the impacts of surface water on railway infrastructure stability, evaluate drainage system efficiency, and propose appropriate engineering solutions for the approximately 32-km Al-Khums–Kaam railway line in Libya. A descriptive-analytical approach was adopted, supported by a critical review of previous studies and a limited applied case study. Available climatic and geological information and hypothetical engineering scenarios were employed to examine surface runoff, soil characteristics, and alternative drainage solutions. The analytical findings indicated that water accumulation and reduced ballast permeability could increase instability risks, while effective drainage requires integrating culverts, side ditches, internal drainage, and geotechnical improvements. The scenarios also suggested potential benefits from enlarging culverts, constructing retention basins, and incorporating geosynthetic materials, although these outcomes require field validation. The study recommends conducting detailed topographic surveys, geotechnical investigations, and hydrological assessments, alongside employing Geographic Information Systems (GIS) and hydraulic modeling to identify vulnerable sections. Furthermore, preventive maintenance, early monitoring, and risk-based engineering design are recommended to enhance infrastructure resilience, reduce long-term maintenance costs, and support the sustainability and operational reliability of railway projects in Libya

تقييم تأثير المياه السطحية في استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية وكفاءة أنظمة التصريف: دراسة تحليلية تطبيقية لخط الخمس–كعام في ليبيا

فؤاد سالم القهواجي[1]*، عبدالباسط أحمد عبدالصمد[2]، حياة حسنى شلفيط[3]
[3,2,1]قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة المراقب، الخمس، ليبيا

الملخص

تُعد السكك الحديدية من ركائز البنية التحتية الداعمة للتنمية الاقتصادية والمستدامة، غير أن تعرض منشآتها للمياه السطحية يشكل تحديًا هندسيًا يؤثر في استقرار المسارات وكفاءتها التشغيلية .وتتمثل مشكلة الدراسة في احتمالية تدهور التربة التأسيسية وطبقات التزليط نتيجة تجمع مياه الأمطار وضعف كفاءة أنظمة التصريف، وما يرتبط بذلك من مخاطر الهبوط والانجراف والتشوهات الإنشائية .هدفت الدراسة إلى تقييم تأثير المياه السطحية في استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية، وتحليل كفاءة أنظمة التصريف، واقتراح بدائل هندسية ملائمة لخط الخمس–كعام في ليبيا، الممتد لمسافة تقارب 32كيلومترًا .اعتمدت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي، مدعومًا بالاستقراء النقدي للدراسات السابقة ودراسة حالة تطبيقية محدودة، باستخدام بيانات مناخية وجيولوجية متاحة وسيناريوهات هندسية افتراضية لتحليل الجريان السطحي وخصائص التربة ومقارنة بدائل التصريف .وأظهرت الاستنتاجات التحليلية أن تراكم المياه وتراجع نفاذية طبقات التزليط قد يزيدان احتمالات فقدان الاستقرار، وأن كفاءة التصريف تتطلب التكامل بين العبارات والخنادق الجانبية والتصريف الداخلي والمعالجة الجيوتكنيكية .كما أشارت السيناريوهات إلى جدوى محتملة لتوسيع العبارات وإنشاء أحواض الاحتجاز واستخدام المواد الجيوصناعية، دون اعتبار النتائج الافتراضية دليلًا ميدانيًا نهائيًا .وأوصت الدراسة بإجراء مسوحات طبوغرافية واختبارات جيوتكنيكية وهيدرولوجية تفصيلية، وتوظيف نظم المعلومات الجغرافية والنمذجة الهيدروليكية لتحديد المقاطع الأكثر تعرضًا للمخاطر، إلى جانب تطوير برامج الصيانة الوقائية والرصد المبكر .وتؤكد الدراسة ضرورة اعتماد تصميم هندسي قائم على المخاطر والتحقق الميداني لتعزيز مرونة واستدامة مشروعات السكك الحديدية الليبية، مع مراعاة الجدوى الاقتصادية والظروف المناخية المحلية عند اختيار التدخلات المناسبة لكل مقطع، بما يسهم في تقليل تكاليف الصيانة المستقبلية وتحسين سلامة المنشآت واستمرارية خدمات النقل على المدى الطويل

الكلمات المفتاحية

المياه السطحية؛ البنية التحتية للسكك الحديدية؛ أنظمة التصريف؛ الاستقرار الجيوتكنيكي؛ خط الخمس–كعام

1. المقدمة

أصبح ارتفاع منسوب المياه السطحية و تأثيرها على البنى التحتية للسكة الحديدية مصدر قلق في الاونة الاخيرة، مما يسبب في أنهيار وتشويه وتقليل من عمرها، ونظراً لارتفاع منسوب المياه الجوفية بالقرب من البنى التحتية يؤثر بشكل كبير على الاساسات من حيث قدرة تحملها و امكانية هبوطها . لذلك من الضروري تحديد منسوب المياه السطحية قبل و أثناء وبعد انشاء المنشاء والاهتمام بتصريفها تصريفاً جيداً . ولان وسائل النقل بصورة عامة تعتبر من أهم الهياكل الاساسية وشرطاً أساسياً لتحقيق التنمية في أي بلد وتعتبر السكك الحديدة هي أهم الدعامات الاساسية للنقل لما لها من مساهمة فاعلة في زيادة معدلات الانتاج وتقدم البلدان ورفاهية المجتمعات. وأهم ركيزة في السكك الحديدية هي البنية التحتية لها متمثلة في الاساس الترابي وقطاع التزليط الذي يعتبر أساس كل البنى الفوقية فوقها من عوارض وقضبان ووحدات متحركة وما تحويه من ركاب أو بضائع . لذا كان من الضروري الاهتمام بهذه الركيزة والمحافظة عليها عند وبعد انشاء خطوط السكك الحديدية وأن من أهم ما يعرض هذه البنية للانهيار أو التشوهه أو تقليل عمرها هي المياه السطحية إذا لم يتم الاهتمام بتصريفها تصريفاً جيداً بعيداً عن أساس السكة و تركيبها (Li & Wilk 2021).

2. مشكلة البحث

تعتبر المياه السطحية المتمثلة اساساً في مياه الامطار بالأضافة إلي الفيضانات الناتجة من فيضان الانهار أو السدود أو الاودية المجاورة أو حتى البحار أو ذوبان الثلوج فأياً كان مصدر هذه المياه تعتبر خطراً كبيراً جداً على جميع المنشأت المدنية وربما حتى على حياة البشر ولما تتعرض له من ثلوث فيكون لها تأثير كيميائي خاصة إن لم يكن أساسات البنى غير معزولة بالمواد المقاومة للرطوبة . ويظهر تاثير المياه السطحية على الأساس بعد فترة وتختلف مدتها وفقاً لدرجة الأملاح المتواجدة وخصائصها وقوة تأثيرها وتصريفها بالشكل المناسب لذلك فإن دراسة تأثير المساه السطحية على البنى التحتية لسكك الحديدة مهم جداً لتجنب اي مشاكل مستقبلية .

لذا أراد الباحث في هذه الدراسة جمع بعض الدراسات العلمية القديمة والحدثية المتعلقة بهذا الجانب ومحاولة تلخيصها وتحليلها ومحاولة استنباط ما يمكن تغيره على جزء من موقع من مواقع السكة الحديدية في مدينة الخمس بليبيا .

3. أهداف البحث

تكمن أهداف هذا البحث في:

1. دراسة بعض الابحاث العلمية المتعلقة بأرتفاع و بتصريف المياه السطحية عن اساس السكة الحديدية ومحاولة تحليلها.
2. تحديد بعض مواقع السكة الحديدية المنفذة في مدينة الخمس ورسم قطاعات عرضيه لها وتجميع بعض البيانات الخاصة بالموقع.
3. اعتماد بيانات افتراضية لمشروع السكة الحديدية من خلال ما تم دراسته وعمل توصيات خاصة بذلك عند تنفيذ مشروع السكة الحديدية في ليبيا.
4. وضع حلول مناسبة للبنى التحتية المتضررة وكيفية تجنب خطرها في المستقبل

4. موقع وجيو لوجية منطقة الدراسة

تقع منطقة الدراسة في مدينة الخمس بطول الخط الواصل للسكة الحديدية والممتد من ميناء الخمس البحري الي منطقة كعام بطول 32 كم كما موضح بالشكل (1).

شكل 1. خط السكة الحديدية المدروس الخمس _ كعام



5. الدراسات السابقة

حظيت دراسة تأثير المياه السطحية في استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية باهتمام متزايد في الأدبيات الهندسية، نظرًا لما يترتب على تراكم مياه الأمطار والجريان السطحي من تغيرات في الخصائص الجيوتكنيكية للتربة، وانخفاض قدرتها على التحمل، وتدهور كفاءة طبقات التزليط، فضلًا عن احتمالية حدوث الهبوط التفاضلي

والانجراف والانهيارات الموضعية. وقد تناولت الدراسات السابقة هذه الإشكالية من زوايا متعددة، شملت تقييم كفاءة أنظمة التصريف، وتحليل سلوك التربة تحت تأثير المياه، وتوظيف المواد الجيوصناعية في تحسين استقرار المنشآت الترابية، واستخدام النمذجة العددية ونظم المعلومات الجغرافية لتقييم مخاطر الفيضانات .وفي هذا السياق، يستعرض البحث الدراسات المحلية والدولية بصورة مترابطة، انطلاقًا من تشخيص المشكلات الهيدرولوجية والجيوتكنيكية، مرورًا بتقييم الحلول الهندسية التقليدية والحديثة، وصولًا إلى تحديد الفجوة البحثية التي تسعى الدراسة الحالية إلى معالجتها في مشروع خط السكك الحديدية الخمس–كعام بليبيا.

تناولت دراسة Açıl وآخرين (2023) تقييم كفاءة منشآت تصريف المياه السطحية والعبارات في الطرق الغابية ذات الخصائص الطبوغرافية المتباينة، من خلال دمج بيانات المسح الجوي باستخدام الطائرات المسيّرة (UAV) مع التحليل الهيدرولوجي والمحاكاة الهيدروليكية باستخدام برنامج .(HEC-RAS) وهدفت الدراسة إلى التحقق من مدى ملاءمة الأبعاد الهندسية للعبارات القائمة لاستيعاب تدفقات السيول التصميمية، ومقارنتها بالأبعاد المطلوبة وفق الحسابات الهيدرولوجية والمعادلات التجريبية. واعتمد الباحثون فترة عودة مقدارها 50 سنة لتقدير التدفقات القصوى وتقييم مخاطر تجاوز الطاقة الاستيعابية لمنشآت التصريف. وأبرزت الدراسة أهمية استخدام البيانات الطبوغرافية الدقيقة والنمذجة الهيدروليكية في تحديد أبعاد العبارات وتقييم كفاءتها، بدلًا من الاعتماد على التقديرات التقليدية وحدها. وتكتسب هذه النتائج أهمية بالنسبة للدراسة الحالية، إذ تؤكد ضرورة إعادة تقييم السعة الهيدروليكية للعبارات الواقعة على امتداد خط السكك الحديدية الخمس–كعام، استنادًا إلى خصائص أحواض التجميع والانحدارات الطبيعية والتدفقات التصميمية المتوقعة، بما يسهم في الحد من تجمع المياه السطحية ومخاطر انجراف التربة وضعف استقرار المنشآت الترابية.

تناولت دراسة Tasalloti وآخرين (2020) كفاءة أنظمة تصريف المياه في البنية التحتية للسكك الحديدية، مع التركيز على تأثير تراكم المياه داخل طبقات التزليط والتربة التأسيسية في الاستقرار الإنشائي للمسار. واعتمدت الدراسة على نماذج فيزيائية بالحجم الكامل، مدعومة بالمحاكاة العددية لتدفق المياه في التربة غير المشبعة، بهدف تقييم أداء أنظمة التصريف الخلوية الجيوصناعية (Geocellular Drainage Systems)مقارنة بظروف التصريف التقليدية. وأظهرت النتائج أن إدماج وحدات التصريف الخلوية أسفل المسار يسهم في خفض مناسيب المياه داخل التربة التأسيسية، ولا سيما عند تلوث طبقة التزليط بالجسيمات الدقيقة، فضلًا عن المساعدة في انتقال هذه الجسيمات بعيدًا عن الطبقة الحصوية. وتتفق هذه النتائج مع دراسة Ghataora و Rushton (2012)، التي كشفت أن المياه قد تظل محتجزة داخل بعض أجزاء قطاع السكة الحديدية

لأكثر من أسبوع، حتى في المناطق القريبة من المصارف، مما يزيد احتمالية التشوهات والحاجة إلى أعمال الصيانة. وتبرز أهمية الدراستين في التأكيد أن كفاءة تصريف المياه لا تعتمد على وجود الخنادق والمصارف الجانبية وحدها، وإنما تتطلب مراعاة حركة المياه داخل الطبقات الحاملة وخصائص التربة ونفاذية المواد الحصوية وكفاءة الربط بين أنظمة التصريف الداخلية والخارجية. وتستفيد الدراسة الحالية من هذه النتائج في تقييم المخاطر المحتملة لتراكم المياه السطحية على امتداد خط الخمس–كعام في ليبيا، وفي اقتراح حلول هندسية متكاملة لتحسين التصريف والحد من الهبوط والتشوهات، مع ضرورة التحقق من ملاءمتها للظروف الهيدرولوجية والجيوتكنيكية المحلية.

وانتقالًا من تقييم كفاءة أنظمة التصريف إلى تحسين الخصائص الجيوتكنيكية للتربة، تناولت دراسة Gao وآخرين (2020) سلوك الهبوط في التربة التأسيسية الضعيفة المدعمة بالأعمدة الحجرية المغلفة بشبكات الجيوجريد(Geogrid-Encased Stone Columns) ، بالتكامل مع طبقة رملية محسنة بالخلايا الجيوصناعية .(Geocells) واعتمدت الدراسة على التحليل العددي باستخدام برنامج(PLAXIS 2D) ، مع مقارنة نتائج المحاكاة ببيانات المراقبة الميدانية، بهدف تقييم تأثير طول التغليف الجيوصناعي وخصائص طبقة التدعيم في توزيع الإجهادات والحد من الهبوط والتشوهات الجانبية. وأظهرت النتائج أن زيادة طول تغليف الأعمدة الحجرية من مرة واحدة إلى ثمانية أضعاف قطر العمود أسهمت في خفض الهبوط خلال مرحلتي الإنشاء وما بعد الإنشاء بنسبة 32.2% و35.1% على التوالي، كما ساعدت الطبقة الرملية المدعمة بالخلايا الجيوصناعية في تحسين توزيع الأحمال وتقليل الهبوط التفاضلي. وكشفت الدراسة أن زيادة طول التغليف إلى نحو أربعة أضعاف قطر العمود قد تحقق توازنًا مناسبًا بين الأداء الجيوتكنيكي والتكلفة الاقتصادية في الظروف المدروسة. وتبرز أهمية هذه النتائج في تأكيد فاعلية الجمع بين الأعمدة الحجرية والتدعيم الجيوصناعي لتحسين استقرار المنشآت الترابية المقامة على التربة الضعيفة، بما يوفر أساسًا علميًا للاستفادة من هذه التقنيات في مشروعات السكك الحديدية. غير أن تطبيقها على خط الخمس–كعام في ليبيا يتطلب إجراء اختبارات جيوتكنيكية محلية للتحقق من ملاءمة التربة وأبعاد الأعمدة وخصائص مواد التدعيم، مع التأكيد أن تحسين مقاومة التربة يمثل إجراءً مكملًا لأنظمة التصريف، وليس بديلًا عنها.

واستكمالًا لهذا الاتجاه، بحثت دراسة Chen وآخرين (2018) تأثير درجة دمك التربة ومحتواها من المواد الدقيقة في حركة المياه وتوزيع الرطوبة داخل الطبقات التأسيسية للسكك الحديدية عالية السرعة، من خلال تطوير نموذج عددي يحاكي تسرب مياه الأمطار وانتقالها عبر طبقات التربة المختلفة. واعتمدت الدراسة على بيانات الهطول المطري المسجلة بمدينة هانغتشو الصينية لعام 2013، مع محاكاة تطور حركة الرطوبة خلال فترة امتدت إلى ثلاث سنوات، بهدف تقييم تأثير الخصائص الهيدروليكية للتربة في تشكل مناطق التشبع المائي. وأظهرت النتائج أن زيادة درجة الدمك أو نسبة المواد الدقيقة تؤدي إلى اتساع مناطق التشبع داخل التربة، نتيجة ارتفاع قدرتها على الاحتفاظ بالمياه وانخفاض نفاذيتها، كما تؤثر هذه الخصائص في سرعة تقدم جبهة البلل والتغيرات في المحتوى المائي الحجمي على أعماق مختلفة. وأكدت الدراسة أهمية توفير أنظمة تصريف فعالة تعمل على إزالة المياه قبل وصولها إلى الطبقات التأسيسية العميقة، بما يسهم في الحد من تراكم الرطوبة والمحافظة على استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية. وتبرز أهمية هذه النتائج بالنسبة للدراسة الحالية في تأكيد أن تقييم كفاءة تصريف المياه السطحية على امتداد خط الخمس–كعام في ليبيا ينبغي ألا يقتصر على معدلات الهطول المطري والتدفقات السطحية، بل يجب أن يشمل الخصائص الجيوتكنيكية والهيدروليكية للتربة، ولا سيما النفاذية ودرجة الدمك ونسبة المواد الدقيقة، باعتبارها عوامل أساسية في تحديد قابلية التربة للتشبع وتقييم الحاجة إلى تحسين أنظمة التصريف.

تناولت دراسة Ciotlaus و Kollo (2018)تأثير تنظيف طبقة التزليط وإعادة تدوير موادها في استقرار مسارات السكك الحديدية ذات القضبان الملحومة بصورة مستمرة (Continuously Welded Rail)، مع التركيز على العلاقة بين تراكم المواد الدقيقة داخل الطبقة الحصوية ومقاومة المسار للانبعاج الناتج عن الإجهادات الحرارية. واعتمدت الدراسة على منهج تحليلي باستخدام طريقة الطاقة (Energy Method)لتقدير قوة الاستقرار الحرجة في ظل ثلاث حالات مختلفة من تلوث طبقة التزليط، شملت المقاطع المستقيمة والمنحنية، مع مراعاة التشوهات الهندسية للمسار وظروف الصيانة، ومقارنة النتائج بحالة تطبيقية فعلية لأحد قطاعات السكك الحديدية التي خضعت لأعمال تنظيف التزليط. وأظهرت الدراسة أن تراكم المواد الدقيقة وتدهور الخصائص

الميكانيكية للطبقة الحصوية، بالتزامن مع عدم انتظام هندسة المسار وضعف الصيانة، يمكن أن يؤثر سلبًا في المقاومة الجانبية والطولية للقضبان، ويزيد احتمالية فقدان الاستقرار تحت تأثير الأحمال الحرارية. كما أبرزت أهمية تنظيف طبقة التزليط والمحافظة على خصائصها الهندسية لضمان توزيع الأحمال وتحسين استقرار المسار وإطالة عمره التشغيلي. وتكتسب هذه النتائج أهمية بالنسبة للدراسة الحالية، إذ تؤكد ضرورة الاهتمام بالصيانة الدورية لطبقة التزليط والحد من تراكم المواد الدقيقة داخلها، باعتبار ذلك أحد المتطلبات الأساسية للمحافظة على كفاءة البنية التحتية للسكك الحديدية. غير أن الدراسة الحالية توسع نطاق التحليل ليشمل العلاقة بين تلوث التزليط وتراجع نفاذيته وتراكم المياه السطحية، وهي علاقة تستدعي الاستناد إلى دراسات هيدروليكية متخصصة إلى جانب نتائج Ciotlaus و Kollo (2018).

وفي اتجاه مكمل للدراسات التي تناولت تحسين الخصائص الجيوتكنيكية للبنية التحتية للسكك الحديدية، بحثت دراسة Shahraki (2019) تأثير تدعيم التربة الضعيفة بالأعمدة الحجرية في استقرار مسارات السكك الحديدية، من خلال توظيف النمذجة العددية لتحليل الاستجابة الميكانيكية للتربة والمنشآت الترابية تحت الأحمال المؤثرة. وركزت الدراسة على تقييم سلوك الهبوط والتشوهات وتوزيع الإجهادات في الطبقات التأسيسية، مع مقارنة أداء التربة الطبيعية بحالتها بعد التحسين باستخدام الأعمدة الحجرية. وأبرزت الدراسة أهمية الخصائص الميكانيكية للتربة وأبعاد الأعمدة الحجرية وتوزيعها الهندسي في تحديد كفاءة التدعيم والحد من التشوهات التي قد تؤثر في استقرار المسار. وتتوافق هذه النتائج مع ما توصلت إليه دراسة Khatri و(2025) Maheshwari، التي اعتمدت على نموذج عددي ثلاثي الأبعاد باستخدام طريقة العناصر المحددة (FEM)لتقييم أداء مسارات السكك الحديدية المزدوجة المدعمة بالأعمدة الحجرية تحت تأثير الأحمال المتحركة، وأظهرت أن استخدام هذه الأعمدة يسهم في تقليل الهبوط، وأن فعالية التحسين تتأثر بمعامل مرونة التربة وطول الأعمدة والمسافات الفاصلة بينها ونسبة تباعدها إلى أقطارها. وتبرز أهمية الدراستين في تأكيد أن تحسين استقرار المنشآت الترابية للسكك الحديدية يتطلب الجمع بين المعالجة الجيوتكنيكية والتصميم الهندسي الملائم، مع ضرورة مراعاة الخصائص المحلية للتربة وظروف التحميل. وتستفيد الدراسة الحالية من هذه النتائج في طرح الأعمدة الحجرية بوصفها أحد البدائل المحتملة لتحسين استقرار التربة الضعيفة على امتداد خط الخمس–كعام في ليبيا، مع التأكيد أن اعتماد هذا الحل يستلزم التحقق من خصائص التربة ومدى تعرضها للتشبع بالمياه، وأن تقنيات تحسين التربة لا تُغني عن توفير أنظمة فعالة لتصريف المياه السطحية.

وفيما يتعلق بالمقارنة بين تقنيات تصريف المياه في البنية التحتية للسكك الحديدية، تناولت دراسة Tasalloti وآخرين (2020) تقييم الأداء الهيدروليكي لأنظمة التصريف التقليدية والأنظمة الحديثة المعتمدة على الوحدات الخلوية الجيوصناعية (Geocellular Drainage Systems) ، بهدف الحد من تراكم المياه داخل طبقات التزليط والتربة التأسيسية. واعتمدت الدراسة على تجارب فيزيائية واسعة النطاق تحاكي قطاعًا من مسار السكة الحديدية، مدعومة بنموذج عددي باستخدام برنامج (Abaqus)لمحاكاة حركة المياه في التربة غير المشبعة، مع معايرة النموذج والتحقق من نتائجه بالاعتماد على البيانات التجريبية. وأظهرت النتائج أن استخدام وحدات التصريف الخلوية أسفل المسار يسهم في خفض منسوب المياه داخل التربة التأسيسية مقارنة بالحالة التي لا تتضمن هذه الوحدات، ولا سيما عند تلوث طبقة التزليط بالجسيمات الدقيقة، كما يساعد على انتقال تلك الجسيمات خارج الطبقة الحصوية، مما يعزز كفاءة التصريف ويحد من احتمالية تراكم الرطوبة. وتبرز أهمية هذه النتائج في تأكيد أن تطوير أنظمة التصريف لا ينبغي أن يقتصر على زيادة أبعاد الخنادق والعبارات التقليدية، وإنما يمكن أن يشمل توظيف المواد الجيوصناعية لتحسين حركة المياه داخل الطبقات الحاملة للمسار. وتستفيد الدراسة الحالية من هذه النتائج في اقتراح بدائل هندسية لتحسين تصريف المياه السطحية على امتداد خط الخمس–كعام في ليبيا، مع ضرورة مراعاة الخصائص الهيدرولوجية والجيوتكنيكية المحلية والتحقق من الجدوى الفنية والاقتصادية لهذه البدائل قبل اعتمادها في التنفيذ.

وفي ضوء التأثيرات المناخية المتزايدة على البنية التحتية للسكك الحديدية، تناولت دراسة Palin وآخرين (2021) انعكاسات التغير المناخي والظواهر الجوية المتطرفة في استقرار منشآت السكك الحديدية وكفاءتها التشغيلية، مع التركيز على المخاطر المرتبطة بالأمطار الغزيرة والفيضانات والانهيارات الأرضية والتغيرات المستقبلية في شدة الظواهر المناخية وتكرارها. واعتمدت الدراسة على منهج المراجعة العلمية التحليلية للأدبيات والتجارب الدولية المتعلقة بمخاطر المناخ على شبكات السكك الحديدية، من خلال تحليل العلاقة بين مصادر الخطر المناخي ومستويات التعرض والهشاشة الإنشائية، وتقييم التحديات المرتبطة بتقدير المخاطر المستقبلية في ظل عدم اليقين المناخي. وأظهرت الدراسة أن التغيرات المتوقعة في شدة الظواهر الجوية المتطرفة وتكرارها قد تؤدي إلى زيادة الضغوط على المنشآت الترابية والجسور وأنظمة التصريف، بما يرفع احتمالية الفيضانات وانجراف التربة وتعطل حركة القطارات، ولا سيما في المواقع التي صُممت منشآتها اعتمادًا على بيانات مناخية تاريخية قد لا تعكس الظروف المستقبلية. كما أكدت الدراسة أهمية دمج التوقعات المناخية ضمن تقييم المخاطر والتخطيط الهندسي وإدارة الأصول، وتطوير استراتيجيات التكيف والصيانة الوقائية بما يعزز مرونة البنية التحتية واستدامتها. وتبرز أهمية هذه النتائج بالنسبة للدراسة الحالية في تأكيد ضرورة مراعاة التغيرات المحتملة في شدة الهطول المطري وتدفقات السيول عند تقييم كفاءة العبارات والخنادق الجانبية على امتداد خط الخمس–كعام في ليبيا، وعدم الاقتصار على المعدلات التاريخية للأمطار عند تحديد السعة التصميمية لمنشآت التصريف. غير أن تطبيق هذه التوجهات يتطلب توفير بيانات مناخية محلية موثوقة وإجراء نمذجة هيدرولوجية وهيدروليكية تراعي الخصائص الطبوغرافية والجيوتكنيكية للمسار.

وفيما يتعلق بتأثير أنظمة التصريف في الأداء الجيوتكنيكي للجسور الترابية الحاملة لمسارات السكك الحديدية، تناولت دراسة Briggs وآخرين (2013) العلاقة بين الهطول المطري الغزير وضغوط المياه المسامية داخل المنشآت الترابية المكونة من التربة الطينية، مع التركيز على تأثير نفاذية التربة التأسيسية في حركة المياه واستقرار الجسور الترابية. واعتمدت الدراسة على تحليل بيانات الرصد الميداني لضغوط المياه المسامية المسجلة باستخدام أجهزة قياس الضغط المسامي (Piezometers) في عدد من الجسور الترابية التابعة لشبكة مترو لندن، إلى جانب توظيف النمذجة العددية لتفسير استجابة المنشآت الترابية لظروف الشتاء شديد الرطوبة. وأظهرت النتائج أن ارتفاع معدلات الهطول المطري قد يؤدي إلى زيادة ضغوط المياه المسامية داخل الجسور الترابية الطينية، غير أن حجم هذه الزيادة يتأثر بدرجة كبيرة بنفاذية الطبقات التأسيسية؛ إذ ساعدت الترب الأعلى نفاذية على تصريف المياه من أسفل الجسور الترابية والمحافظة على مستويات أقل من الضغط المسامي، مقارنة بالمواقع التي ترتكز فيها المنشآت على ترب منخفضة النفاذية. وتؤكد هذه النتائج أن كفاءة التصريف لا ترتبط فقط بقدرة المصارف السطحية على تجميع المياه ونقلها، وإنما تتأثر أيضًا بالخصائص الهيدروليكية للتربة وحركة المياه داخل المنشآت الترابية وتحتها. وتبرز أهمية الدراسة بالنسبة للبحث الحالي في ضرورة الجمع بين تقييم كفاءة العبارات والخنادق الجانبية على امتداد خط الخمس–كعام في ليبيا، وتحليل نفاذية التربة ومستويات المياه الجوفية واحتمالات تراكم الضغط المسامي، بما يسمح بتحديد المقاطع الأكثر تعرضًا لفقدان الاستقرار واقتراح إجراءات مناسبة لتحسين التصريف

السطحي وتحت السطحي. ومع ذلك، فإن تطبيق هذه النتائج في البيئة الليبية يستلزم مراعاة الاختلافات المناخية والجيوتكنيكية بين مواقع الدراسة الأصلية ومسار السكة الحديدية محل البحث.

وفي إطار تقييم المخاطر التشغيلية المرتبطة بالفيضانات، تناولت دراسة Ochsner وآخرين (2023) تأثير الفيضانات في البنية التحتية للسكك الحديدية واستمرارية خدمات النقل، من خلال مراجعة منهجية شملت 24 دراسة علمية منشورة ومفهرسة في قاعدة بيانات Scopus. وركزت المراجعة على تحليل الأضرار الإنشائية والتشغيلية الناجمة عن الفيضانات، بما في ذلك تضرر الجسور الترابية والمنحدرات والمسارات الحديدية والمنشآت المرتبطة بها، إلى جانب تعطّل حركة القطارات وارتفاع تكاليف الإصلاح والصيانة وانخفاض موثوقية خدمات النقل. وأظهرت النتائج أن معظم الدراسات السابقة اهتمت بتقدير آثار الفيضانات السابقة أو المتوقعة مستقبلًا في شبكات السكك الحديدية، في حين حظيت استراتيجيات التكيف والحد من المخاطر باهتمام بحثي أقل نسبيًا. كما كشفت المراجعة عن تركز الدراسات في بعض المناطق الأوروبية، ولا سيما المملكة المتحدة ودول الألب، الأمر الذي يشير إلى تفاوت التغطية الجغرافية للبحوث المتعلقة بمخاطر الفيضانات على السكك الحديدية. وأكد الباحثون أهمية فهم آثار الفيضانات السابقة وتقييمها بصورة منهجية بوصف ذلك أساسًا لتقدير المخاطر المستقبلية وتطوير استراتيجيات فعالة للتكيف وتعزيز مرونة البنية التحتية. وتبرز أهمية هذه النتائج بالنسبة للدراسة الحالية في تأكيد أن قصور أنظمة تصريف المياه السطحية على امتداد خط الخمس–كعام في ليبيا قد تكون له انعكاسات تتجاوز الأضرار الجيوتكنيكية والإنشائية لتشمل السلامة التشغيلية واستمرارية الخدمة والتكاليف الاقتصادية. كما تدعم النتائج ضرورة إدماج تقييم مخاطر السيول وإجراءات الصيانة الوقائية والإنذار المبكر ضمن التخطيط المستقبلي للمسار، مع مراعاة خصوصية البيئة الليبية من حيث تذبذب الهطول المطري واحتمالية حدوث جريان سطحي مرتفع خلال فترات زمنية قصيرة.

ومن منظور أكثر تخصصًا في تحليل حركة المياه داخل طبقة التزليط، تناولت دراسة Rahman وآخرين (2024) تأثير تراكم المواد الدقيقة وتنظيف أكتاف المسار في الأداء الهيدروليكي لطبقة التزليط، من خلال تطوير نموذج عددي لمحاكاة التدفق متعدد الأطوار (Multiphase Flow)وانتقال مياه الأمطار داخل الفراغات البينية للمواد الحصوية. واعتمدت الدراسة على ديناميكا الموائع الحسابية(CFD) ، باستخدام طريقة حجم المائع (Volume of Fluid – VOF) ومعادلة دارسي–فورشهايمر(Darcy–Forchheimer) ، ضمن بيئة برنامجOpenFOAM ، لمحاكاة المراحل المتعاقبة لسقوط قطرات المطر وانتقالها عبر الهواء ووصولها إلى سطح التزليط، ثم تسربها داخل الفراغات الحصوية وتصريفها خارج المسار. كما أجرت الدراسة محاكاة بارامترية لتقييم تأثير درجة تلوث التزليط وتوزيع المواد الدقيقة وتنظيف الأكتاف في تراكم الرطوبة وسرعة نفاذ المياه وأعماق اختراقها. وأظهرت النتائج أن ارتفاع مستويات التلوث يؤدي إلى انسداد مسارات الجريان داخل الطبقة الحصوية، وزيادة احتباس المياه وبطء انتقالها وانخفاض كفاءة التصريف، في حين يسهم تنظيف أكتاف المسار في إعادة فتح مسارات الجريان وتحسين قدرة التزليط على تصريف المياه، ولا سيما في المقاطع شديدة التلوث. وتبرز أهمية هذه النتائج في تأكيد أن المحافظة على الأداء الهيدروليكي للبنية التحتية للسكك الحديدية لا تعتمد على التصميم الأولي لمنشآت التصريف فحسب، بل تتطلب أيضًا برامج صيانة دورية تستهدف إزالة المواد الدقيقة والمحافظة على نفاذية طبقة التزليط. وتتصل هذه النتائج بالدراسة الحالية لخط الخمس–كعام في ليبيا، إذ تشير إلى ضرورة الجمع بين تقييم كفاءة العبارات والخنادق الجانبية وفحص حالة التزليط وأكتاف المسار، مع مراعاة أن النتائج المستمدة من المحاكاة الهيدروليكية لا تمثل دليلًا مباشرًا على مقدار التحسن في الاستقرار الإنشائي أو انخفاض الهبوط دون إجراء اختبارات جيوتكنيكية مكملة.

وفي جانب تقييم استقرار المنشآت الترابية الحاملة لمسارات السكك الحديدية، تناولت دراسة Srivastava وآخرين (2024) تحليل استقرار المنحدرات وموثوقية الجسور الترابية ضمن أحد مشروعات ازدواج خطوط السكك الحديدية في الهند، مع التركيز على مدى كفاية معاملات الأمان التقليدية في ظل التباين وعدم اليقين المرتبطين بالخصائص الجيوتكنيكية للتربة. واعتمدت الدراسة على منهج تحليلي يجمع بين طريقة العناصر المحددة(Finite Element Method – FEM) ، وطريقة الموثوقية من الدرجة الأولى – (First Order Reliability Method (FORM، وطريقة سطح الاستجابة (Response Surface Method (RSM –، بهدف تقييم معامل الأمان واحتمالات عدم الاستقرار في الجسر الترابي المقترح. وأظهرت النتائج أن معامل الأمان الأولي لبعض حالات الجسر الترابي كان أقل من الحد المرجعي البالغ 1.40 المعتمد في الإرشادات الهندية، الأمر الذي استدعى دراسة بدائل للتدعيم، ولا سيما استخدام المسامير الأرضية(Soil Nailing) ، التي أسهمت في رفع معامل الأمان إلى مستوى يتجاوز الحد المطلوب. ومع ذلك، كشف التحليل الاحتمالي أن استيفاء معامل الأمان التقليدي لا يضمن بالضرورة تحقيق مستوى مرتفع من الموثوقية، إذ أظهرت بعض الحالات مؤشر موثوقية أقل من 3 في ضوء افتراضات التباين المستخدمة للخصائص الجيوتكنيكية. وتبرز أهمية الدراسة في تأكيد ضرورة التكامل بين التحليل الحتمي والتحليل الاحتمالي عند تصميم المنشآت الترابية للسكك الحديدية، بدلًا من الاعتماد على قيمة منفردة لمعامل الأمان. وتستفيد الدراسة الحالية من هذا التوجه في التأكيد على أن تقييم استقرار البنية التحتية لخط الخمس–كعام في ليبيا ينبغي أن يجمع بين دراسة خصائص التربة وتأثير المياه السطحية وكفاءة منشآت التصريف والتحقق من استقرار المنحدرات والجسور الترابية. كما تشير النتائج إلى أهمية تقييم بدائل التدعيم وفق الظروف الجيوتكنيكية المحلية، مع مراعاة أن دراسة Srivastava وآخرين ركزت على استقرار المنحدرات والموثوقية الإنشائية، ولم تقدم قياسات مباشرة لأداء أنظمة التصريف أو تأثير الأمطار في الجريان السطحي.

وفي سياق قريب، تناولت دراسة Mayuranga و Navaratnarajah (2023)تأثير تلوث طبقة التزليط بالمواد الطينية في نفاذيتها الهيدروليكية وقدرتها على تصريف المياه، من خلال الجمع بين الاختبارات المختبرية واسعة النطاق والتحليل العددي باستخدام برنامج .(SEEP/W) واعتمدت الدراسة على إجراء اختبارات نفاذية لعينات من التزليط عند خمسة مستويات مختلفة من التلوث بالطين الرملي منخفض اللدونة، بهدف تحديد العلاقة بين مؤشر تلوث الفراغات (Void Contamination Index (VCI –ومعامل التوصيل الهيدروليكي، ثم توظيف النتائج المختبرية في نموذج عددي ثنائي الأبعاد لمحاكاة حركة المياه داخل طبقة التزليط تحت ظروف مختلفة من التلوث. وأظهرت النتائج أن زيادة المواد الدقيقة داخل الفراغات الحصوية تؤدي إلى انخفاض حاد في نفاذية طبقة التزليط؛ إذ تجاوز الانخفاض في معامل التوصيل الهيدروليكي 90% عندما بلغ مؤشر تلوث الفراغات 25% أو أكثر، مما يشير إلى أن تراكم كميات محدودة نسبيًا من المواد الطينية قد يؤدي إلى تدهور كبير في كفاءة التصريف. كما أبرزت الدراسة أهمية المحافظة على نظافة الطبقة العلوية للتزليط وأكتاف المسار، واقترحت معيارًا لتقدير كفاءة التصريف والمساعدة في تحديد الحاجة إلى أعمال الصيانة. وتتفق هذه النتائج مع دراسة Ciotlaus و Kollo (2018)في أهمية المحافظة على خصائص طبقة التزليط، وتتكامل مع دراسة Rahman وآخرين (2024) التي تناولت تأثير تنظيف أكتاف المسار في حركة المياه داخل الطبقة الحصوية. وتبرز أهمية هذه الدراسات بالنسبة للبحث الحالي في تأكيد أن تقييم كفاءة تصريف المياه السطحية على امتداد خط الخمس–كعام في ليبيا ينبغي أن يشمل درجة

تلوث التزليط ونفاذيته وحالة أكتاف المسار، إلى جانب السعة الهيدروليكية للعبارات والخنادق الجانبية، مع ضرورة إجراء اختبارات محلية قبل اعتماد حدود التلوث أو برامج الصيانة المقترحة.

وأخيرًا، تناولت دراسة Varra وآخرين (2024) تقييم قابلية تعرض البنية التحتية للسكك الحديدية لمخاطر الفيضانات، من خلال تطوير منهجية تحليل مكاني تجمع بين نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والتحليل متعدد المعايير (MCA) وعملية التحليل الهرمي .(AHP) واعتمدت الدراسة على دمج ثمانية عوامل طبوغرافية وهيدرولوجية وبيئية، شملت الارتفاع والانحدار ومؤشر الرطوبة الطبوغرافية والقرب من المجاري المائية وكثافة شبكة التصريف والغطاء الأرضي والخصائص الجيولوجية والهطول المطري، بهدف إعداد خرائط مكانية تحدد مستويات القابلية للتعرض للفيضانات على امتداد مسارات السكك الحديدية. وطُبقت المنهجية على حوض مائي يضم أحد خطوط السكك الحديدية في جنوب إيطاليا، الذي تعرض لفيضانات مدمرة خلال خريف عام 2015، حيث أُنتجت خريطتان؛ اعتمدت الأولى على العوامل الجيوفيزيائية الثابتة، بينما أضافت الثانية تأثير الهطول المطري بوصفه عاملًا ديناميكيًا محفزًا للفيضانات. وأظهرت النتائج أن أجزاء واسعة من المسار تقع ضمن مناطق ذات قابلية مرتفعة جدًا للتعرض للفيضانات، ولا سيما المواقع القريبة من المجاري المائية وروافدها ومناطق التقاء شبكات التصريف. كما أظهرت المقارنة بين خرائط القابلية ومواقع الأضرار المسجلة عقب فيضانات عام 2015 توافقًا جيدًا، في حين لم توفر بعض الخرائط الرسمية للغمر الفيضي معلومات كافية عن المخاطر المرتبطة بالروافد الثانوية والجريان الناتج مباشرة عن الأمطار. وأكدت الدراسة أهمية توظيف التحليل المكاني متعدد المعايير في الكشف الاستباقي عن المقاطع الأكثر تعرضًا للمخاطر، وتحديد أولويات الفحص والصيانة والتدخلات الهندسية، بما يعزز مرونة شبكات السكك الحديدية ويحد من الخسائر المحتملة. وتبرز أهمية هذه النتائج بالنسبة للدراسة الحالية في إمكانية الاستفادة من نظم المعلومات الجغرافية لتحديد المقاطع الأكثر تعرضًا لتجمع المياه والسيول على امتداد خط الخمس–كعام في ليبيا، وربطها بخصائص الأحواض المائية والانحدارات وشبكات التصريف، بما يدعم توجيه إجراءات الحماية والصيانة نحو المواقع ذات الأولوية، مع ضرورة التحقق من النتائج باستخدام بيانات محلية ونماذج هيدرولوجية وهيدروليكية مناسبة.

5.1 *التعليق النقدي على الدراسات السابقة*

يكشف التحليل النقدي للدراسات السابقة عن تطور ملحوظ في تناول العلاقة بين المياه السطحية واستقرار البنية التحتية للسكك الحديدية؛ إذ انتقلت الاهتمامات البحثية من تقييم كفاءة منشآت التصريف التقليدية إلى تحليل التفاعلات الهيدرولوجية والجيوتكنيكية داخل الطبقات التأسيسية، ثم إلى توظيف النمذجة العددية والتقنيات الجيوصناعية ونظم المعلومات الجغرافية في تقييم المخاطر وتحسين الأداء الإنشائي. وعلى الرغم من هذا التطور، فإن الأدبيات المستعرضة لا تقدم إطارًا تطبيقيًا موحدًا يجمع بصورة مباشرة بين خصائص الجريان السطحي والسعة الهيدروليكية لمنشآت التصريف ونفاذية طبقة التزليط واستقرار التربة التأسيسية، الأمر الذي يحد من إمكانية توظيف نتائجها بصورة متكاملة في تقييم مسارات السكك الحديدية الواقعة ضمن البيئات شبه الجافة، ومنها خط الخمس–كعام في ليبيا.

فمن الناحية الهيدرولوجية، أبرزت دراسة Açıl وآخرين (2023) أهمية البيانات الطبوغرافية الدقيقة والنمذجة الهيدروليكية في تقييم ملاءمة أبعاد العبارات لاستيعاب التدفقات التصميمية، وهو اتجاه يتفق مع أهداف الدراسة الحالية في إعادة النظر في كفاءة منشآت تصريف المياه السطحية. غير أن الدراسة تناولت منشآت تصريف مرتبطة بالطرق الغابية، ولم تتوسع في تحليل انعكاسات قصور التصريف على الطبقات التأسيسية للسكك الحديدية. وفي المقابل، ركزت دراستا Tasalloti وآخرين (2020) و Ghataoraو (2012) Rushtonعلى حركة المياه داخل قطاع المسار الحديدي، وأظهرتا أهمية التكامل بين المصارف الخارجية والتصريف الداخلي. ويكشف هذا التباين أن تقييم السعة الهيدروليكية للعبارات وحدها لا يكفي للحكم على كفاءة منظومة التصريف؛ فقد تتمكن المنشآت الخارجية من تمرير التدفقات التصميمية، بينما تظل المياه محتجزة داخل التزليط أو التربة التأسيسية بسبب ضعف النفاذية أو عدم كفاءة مسارات خروج المياه.

وعلى المستوى الجيوتكنيكي، تتفق نتائج Chen وآخرين (2018) و Briggsوآخرين (2013) في تأكيد الدور الحاسم لخصائص التربة الهيدروليكية في التحكم بحركة الرطوبة وضغوط المياه المسامية داخل المنشآت الترابية. غير أن الدراستين اختلفتا في منهج المعالجة؛ إذ ركزت الأولى على محاكاة انتقال الرطوبة وتأثير الدمك والمواد الدقيقة، بينما استعانت الثانية ببيانات الرصد الميداني والنمذجة العددية لتفسير استجابة الجسور الترابية للأمطار الغزيرة. وتوضح المقارنة أن انخفاض نفاذية التربة لا يؤدي بالضرورة إلى نمط واحد من الاستجابة، بل تتحدد آثاره وفق طبيعة الطبقات ومواقعها وطرق تصريف المياه وحدود التشبع. ولذلك فإن تعميم نتائج هذه الدراسات على خط الخمس–كعام دون توصيف جيوتكنيكي محلي قد يؤدي إلى تقديرات غير دقيقة لمخاطر الهبوط وفقدان الاستقرار.

وفيما يتعلق بطبقة التزليط، أظهرت دراسات Ciotlaus و Kollo (2018)، و Mayuranga وNavaratnarajah (2023)، و Rahman وآخرين (2024) اتفاقًا في أهمية المحافظة على الخصائص الهندسية للمواد الحصوية والحد من تراكم المواد الدقيقة. إلا أن هذه الدراسات تناولت المشكلة من زوايا مختلفة؛ فقد ركزت الأولى على الاستقرار الميكانيكي للمسارات الملحومة، بينما اختبرت الثانية تأثير التلوث الطيني في التوصيل الهيدروليكي، واعتمدت الثالثة على محاكاة التدفق متعدد الأطوار لتقييم أثر تنظيف أكتاف المسار. ويُعد هذا الاختلاف مصدرًا للتكامل العلمي، لكنه يكشف في الوقت نفسه عن محدودية الربط المباشر بين نتائج التحليل الهيدروليكي ومؤشرات الأداء الإنشائي، مثل الهبوط التفاضلي والتشوهات المتراكمة تحت الأحمال الديناميكية. ومن ثم، فإن إثبات تحسن نفاذية التزليط لا يكفي وحده للجزم بتحسن استقرار المسار دون قياسات أو نماذج ميكانيكية مكملة.

أما الدراسات التي تناولت تقنيات تحسين التربة، فقد أوضحت Gao وآخرون (2020)، و Shahraki (2019)، و Khatri و Maheshwari (2025) أهمية الأعمدة الحجرية والمواد الجيوصناعية في تحسين توزيع الأحمال والحد من الهبوط. وتتفق هذه الدراسات في أن فعالية التدعيم تتأثر بالخصائص الجيوتكنيكية للتربة والتوزيع الهندسي لعناصر التحسين، لكنها تختلف في نوع النمذجة ومستوى التحقق من النتائج. ويلاحظ نقديًا أن هذه المعالجات تركز أساسًا على تحسين المقاومة والتشوه، بينما لا تعالج بالضرورة مصدر المياه المتراكمة أو قصور منشآت التصريف الخارجية. ولذلك فإن الاعتماد على التدعيم الجيوتكنيكي دون معالجة أسباب التشبع قد يوفر تحسينًا إنشائيًا محدود الفاعلية على المدى الطويل. وتؤكد دراسة Srivastavaوآخرين (2024) هذا التوجه من زاوية أخرى، إذ أبرزت أن استيفاء معامل الأمان التقليدي لا يضمن بالضرورة مستوى كافيًا من الموثوقية، مما يستدعي مراعاة عدم اليقين في خصائص التربة وظروف التشغيل.

وفي البعد المناخي والتشغيلي، كشفت دراستا Palin وآخرين (2021) و Ochsner وآخرين (2023) أن آثار الفيضانات لا تقتصر على تلف المنشآت الترابية، بل تمتد إلى تعطل خدمات النقل وارتفاع تكاليف الصيانة وتراجع موثوقية الشبكات. وتتميز الدراستان بتوسيع نطاق التحليل من الأداء الهندسي المباشر إلى المرونة المناخية والاستمرارية التشغيلية، غير أن طبيعتهما المرجعية تحد من إمكانية استخراج معاملات تصميمية أو نسب أداء قابلة للتطبيق المباشر على موقع محدد. كما أن

تركز جزء مهم من الأدبيات المستعرضة في البيئات الأوروبية والآسيوية يفرض الحذر عند نقل نتائجها إلى المناطق الليبية التي قد تتسم بتذبذب الهطول المطري وارتفاع شدة الجريان خلال عواصف قصيرة المدة.

ومن منظور التحليل المكاني، قدمت دراسة Varra وآخرين (2024) إضافة منهجية مهمة من خلال دمج نظم المعلومات الجغرافية والتحليل متعدد المعايير لتحديد المقاطع الأكثر قابلية للتعرض للفيضانات، والتحقق من نتائج التصنيف باستخدام مواقع الأضرار التاريخية. ومع ذلك، فإن خرائط القابلية للتعرض لا تمثل بديلًا عن النمذجة الهيدروليكية التفصيلية؛ إذ لا تحدد بصورة مباشرة أعماق الغمر وسرعات الجريان أو السعات المطلوبة للعبارات. كما تتأثر نتائجها باختيار المعايير وأوزانها ودقة البيانات المكانية. ومن هنا، فإن القيمة الحقيقية لهذه الأدوات تكمن في استخدامها لتحديد أولويات الدراسة والفحص، ثم استكمالها بالتحليل الهيدرولوجي والجيوتكنيكي للمقاطع الحرجة.

وبالمقارنة مع الدراسة الحالية، يتضح أن الدراسات السابقة قدمت معرفة متخصصة وعميقة في مكونات منفردة من المشكلة، لكنها اختلفت في مواقعها الجغرافية وخصائص التربة والمناخ وطرائق التحليل ومستويات التحقق التجريبي. وتسعى الدراسة الحالية إلى الاستفادة من هذا التنوع لبناء قراءة تحليلية تطبيقية مترابطة لخط الخمس–كعام، تجمع بين تأثير الجريان السطحي وكفاءة العبارات والخنادق الجانبية وقابلية التربة والتزليط للاحتفاظ بالمياه والمخاطر المحتملة على استقرار المنشآت الترابية. ومع ذلك، ينبغي الإقرار بأن اعتماد الدراسة الحالية على سيناريوهات وافتراضات هندسية، في حدود البيانات المتاحة، يجعل نتائجها تقديرات استرشادية لا ترقى إلى مستوى الإثبات الميداني أو التحقق العددي المعاير. وبذلك فإن قيمتها العلمية لا تقوم على ادعاء تفوق تجريبي على الدراسات السابقة، وإنما على توظيف نتائجها بصورة نقدية متكاملة لتطوير إطار أولي لتقييم المخاطر وتحديد أولويات التحسين في سياق محلي لم يحظ بالتغطية الكافية ضمن الأدبيات المستعرضة.

5.2 الفجوة البحثية

في ضوء التحليل النقدي للدراسات السابقة، تتحدد الفجوة البحثية في محدودية الدراسات التطبيقية المتكاملة التي تتناول العلاقة بين الجريان السطحي وكفاءة منشآت التصريف والاستقرار الجيوتكنيكي للبنية التحتية للسكك الحديدية ضمن السياق الليبي، ولا سيما خط الخمس–كعام. فعلى الرغم من أن الأدبيات الدولية قدمت نماذج متقدمة لتقييم السعة الهيدروليكية للعبارات، وانتقال المياه داخل التربة وطبقات التزليط، وتحسين المنشآت الترابية باستخدام المواد الجيوصناعية، فإن معظم هذه الدراسات عالجت أحد مكونات المشكلة بصورة مستقلة، أو طُبقت في بيئات مناخية وجيوتكنيكية تختلف عن البيئة الليبية. كما أن الدراسات التي استخدمت نظم المعلومات الجغرافية لتحديد المناطق المعرضة للفيضانات لم تربط دائمًا نتائج التصنيف المكاني بالتحقق التفصيلي من كفاءة منشآت التصريف وتأثير قصورها في استقرار المسار الحديدي.

وتتجلى الفجوة كذلك في غياب إطار تحليلي محلي، ضمن الدراسات المستعرضة، يربط بين خصائص الأحواض المائية المحيطة بمسار الخمس–كعام، واحتمالات تجاوز التدفقات السطحية للسعة التصميمية للعبارات والخنادق، وما قد ينجم عن ذلك من تشبع التربة التأسيسية وتدهور نفاذية التزليط وانجراف جوانب الجسور الترابية. ويضاف إلى ذلك محدودية الأدلة المتاحة بشأن الملاءمة الفنية والاقتصادية لبدائل تحسين التصريف والتدعيم في هذا المسار، وعدم توافر أساس ميداني كافٍ لترتيب أولويات التدخلات وفق مستويات المخاطر.

وعليه، تتمثل الفجوة البحثية الرئيسة في الحاجة إلى منهج تحليلي تطبيقي يدمج التقييم الهيدرولوجي والهيدروليكي والجيوتكنيكي ضمن إطار واحد، ويتيح المقارنة الأولية بين بدائل التصريف والحماية، مع مراعاة خصوصية الظروف الطبيعية والهندسية لخط الخمس–كعام. ولا تدّعي الدراسة الحالية سد هذه الفجوة بصورة نهائية، وإنما تسعى إلى معالجتها على المستوى التحليلي الأولي، تمهيدًا لدراسات ميدانية ونمذجة تفصيلية مستقبلية تستند إلى بيانات محلية مقاسة.

5.3 الإسهام العلمي للدراسة الحالية

تتمثل الإضافة العلمية المقترحة للدراسة الحالية في تقديم إطار تحليلي تطبيقي لتقييم تأثير المياه السطحية في استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية وكفاءة أنظمة التصريف، من خلال اتخاذ خط الخمس–كعام في ليبيا حالة دراسية تجمع بين الاعتبارات الهيدرولوجية والهيدروليكية والجيوتكنيكية. ويستند هذا الإطار إلى الاستقراء النقدي لنتائج الدراسات السابقة وتحويلها إلى مؤشرات مترابطة لتفسير العلاقة بين تدفقات الجريان السطحي وقدرة منشآت التصريف على استيعابها، واحتمالات تراكم المياه داخل التربة وطبقات التزليط، وما قد يرتبط بذلك من تراجع في الاستقرار الإنشائي.

فعلى المستوى المعرفي، تسعى الدراسة إلى توسيع تطبيق الأدبيات الدولية في مجال تصريف مياه السكك الحديدية نحو بيئة ليبية لم تتناولها الدراسات المستعرضة بصورة مباشرة، مع إبراز أهمية الخصائص المحلية للمناخ والتضاريس والتربة في تفسير المخاطر. وعلى المستوى المنهجي، تقترح الدراسة الجمع بين تحليل خصائص الجريان السطحي وتقييم السعة التصميمية للعبارات والخنادق الجانبية ومراجعة الخصائص الجيوتكنيكية المؤثرة في انتقال الرطوبة، بدلًا من التعامل مع كل عنصر بمعزل عن الآخر. كما تستفيد من نتائج دراسات التزليط والمواد الجيوصناعية وتحسين التربة في بناء تصور لبدائل الحماية والمعالجة التي يمكن إخضاعها لاحقًا للتحقق الهندسي.

أما على المستوى التطبيقي، فتسعى الدراسة إلى مقارنة سيناريوهات هندسية افتراضية لتحسين كفاءة التصريف، تشمل مراجعة أبعاد العبارات، وتحسين الخنادق الجانبية، والنظر في استخدام منشآت تهدئة الجريان أو الاحتجاز المؤقت، وتحسين نفاذية طبقات التزليط وصيانتها، وتقييم الحاجة إلى تدعيم المنشآت الترابية في المقاطع الحساسة. وتُستخدم هذه السيناريوهات لتوضيح اتجاهات التأثير المحتملة والمفاضلة الأولية بين البدائل، دون اعتبار نسب التحسن المفترضة نتائج تجريبية مثبتة أو تعميمها على كامل المسار.

وتسهم الدراسة كذلك في اقتراح توجه لإدارة المخاطر قائم على تحديد المقاطع ذات الأولوية، استنادًا إلى مؤشرات مثل القرب من مسارات الجريان الطبيعي، والانحدار، واحتمال تجمع المياه، وحالة منشآت التصريف، وقابلية التربة للتشبع. ومن شأن هذا التوجه، بعد التحقق منه ميدانيًا، أن يساعد الجهات الهندسية المختصة في توجيه أعمال الفحص والصيانة والتطوير نحو المواقع الأكثر حاجة إلى التدخل، بدلًا من تطبيق حلول موحدة على جميع أجزاء المسار.

وبناءً على ذلك، فإن الإسهام العلمي للدراسة الحالية يتمثل في التكامل التحليلي بين المعارف الهيدرولوجية والهيدروليكية والجيوتكنيكية وتكييفها مع حالة دراسية ليبية محددة، وإعداد أساس منهجي يمكن تطويره مستقبلًا إلى نموذج تقييم هندسي أكثر دقة. وتظل حدود هذا الإسهام مرتبطة بطبيعة البيانات المتاحة ومستوى التحقق من الافتراضات، مما يستدعي استكماله مستقبلًا بالمسوحات الطبوغرافية والاختبارات الجيوتكنيكية وقياسات الهطول والجريان والمعايرة الميدانية للنماذج، وصولًا إلى توصيات تصميمية قابلة للتنفيذ والتحقق.

تقوم هذه الصياغة على مقارنة الدراسات الواردة في الملف المرفق، بما فيها الدراسات الهيدرولوجية والجيوتكنيكية ودراسات التزليط والمخاطر المناخية والتحليل المكاني .

6. المواد والطرق

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي المدعوم بدراسة حالة ميدانية محدودة وسيناريوهات هندسية افتراضية، بهدف تقييم تأثير المياه السطحية في استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية ومقارنة كفاءة أنظمة التصريف التقليدية والحديثة. واختير قطاع خط السكك الحديدية الممتد من ميناء الخمس البحري إلى منطقة كعام، بطول نحو 32كم، نموذجًا تطبيقيًا للدراسة .واستندت المواد المستخدمة إلى البيانات الجغرافية والجيولوجية والمناخية المتاحة، والقطاعات العرضية للمسار، ونتائج الدراسات السابقة المتعلقة بخصائص التربة والجريان السطحي .وشملت الإجراءات تحليل معدلات هطول الأمطار، ودراسة خصائص التربة الهندسية، بما فيها النفاذية وحدود أتربرغ ونسبة تحمل كاليفورنيا (CBR)، إلى جانب تقييم افتراضي لكفاءة العبارات والخنادق الجانبية في تصريف مياه الأمطار .كما استُخدمت سيناريوهات تحليل هيدرولوجي وهيدروليكي مستندة إلى

الأدبيات الفنية لمقارنة أداء أنظمة التصريف التقليدية مع البدائل المقترحة، مثل توسيع أقطار العبارات، وإنشاء أحواض احتجاز المياه، واستخدام المواد الجيوصناعية .واستهدفت المقارنة تحديد الحلول الأكثر ملاءمة للحد من تشبع التربة والانجراف والهبوط، بما يسهم في تعزيز استقرار المسار واستدامة بنيته التحتية.

7. النتائج

7.1. دراسة حالة وتطبيقات ميدانية وافتراضية

في إطار بناء تطبيقي ميداني افتراضي ونظراً لعدم وجود سكة حديدية مكتملة في ليبيا والمتواجد فقط مشروع بناء السكة الحديدية فتم اختيار قطاع لسكة الحديدية بمدينة الخمس والمخصص لنقل المعدات اللازم للمشروع من الميناء البحري للخمس إلي منطقة كعام . فقد تم اختياره كموقع ميداني للدراسة و تم الاعتماد فيها على بيانات افتراضية مأخوذة من مصادر عامة ودراسات سابقة في الفصول السابقة من البحث ويعتمد هذا السيناريو الأفتراضي على بيانات مناخية و جيولوجية عامة وإختبارات هيدرولجية وإختبارات التربة مأخوذة من دراسات سابقة .

7.2 الوقع الجغرافي والجيولوجي

تقع مدينة الخمس (الواقعة بمركز المرقب الحالي) في الجزء الشرقي من أقليم طرابلس بمنطقة الشريط الساحلي للبحر الأبيض المتوسط على بعد 120 كم شرق العاصمه طرابلس وعلى بعد 36 كم غرب مدينة زليتن [24]. الموقع الجغرافي يُظهر تضاريس منخفضة الانحدار تطل على البحر، مع تلال خفيفة تشير إلى طيّة جيولوجية عريضة مائلة قليلاً باتجاه البحر. وتُظهر الدراسات الجيولوجية أن القطاع الشمالي من ليبيا (بما في ذلك الخمس) يتكوّن من طبقات صخور قديمة من العصر الترياسي/اليوراسي (تشكيلة أبي شايبة) مفصولة بعدد تراكمي عن طبقات كربوناتية كريتاسية (مثل الحجر الجيري الغريان، وتشكيلات آين توباي والجزّار)، وفوقها تغطية بواسطة تكوين الخمس الميوسيني. بينما تشمل الرواسب الرباعية السطحية فُرشاً رملية بحرية وشطوطاً، ورواسب أودية ،ورمال طينية رملية ، تظهر أحياناً فوق الصخور الصلبة وبصفة عامة، تُظهر الخرائط الهيكلية أن المنطقة تسودها طية جيولوجية بسيطة وواسعة تميل بشدة أقل [7].

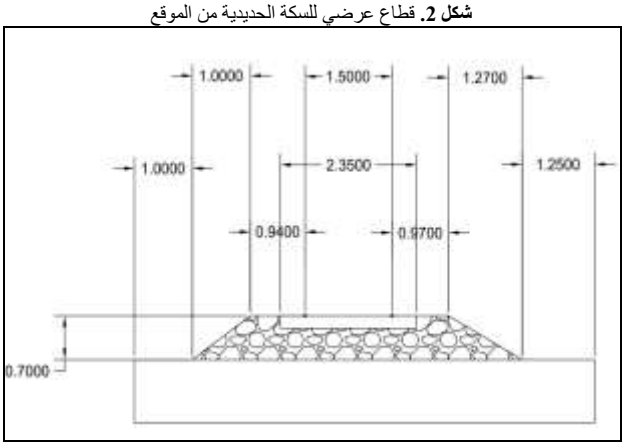
7.3. البنية التحتية و الفوقية لقطاع السكة الحديدية

تتكون السكة الحديدية في مدينة الخمس كغيرها من السكك الحديدة في العالم من :

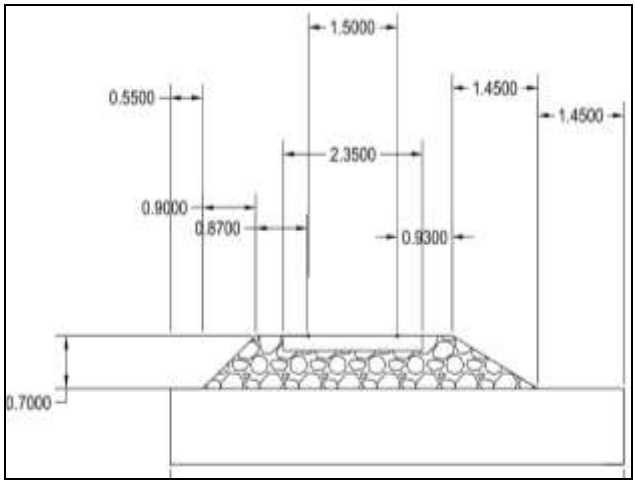
1. البنية التحتية المثمتلة في (أساس السكة subgrade)
2. البنية الفوقية تتكون من القطاعات المهمة الاتية :
3. قطاع التزليط Ballast
4. العوارض Sleepers
5. القضبان Rails

يبين الشكلان "A.5.1" , " B.5.1 " قطاعين عرضيين لسكة حديدية في الموقع المدروس .

شكل 2. قطاع عرضي للسكة الحديدية من الموقع



شكل 3. قطاع عرضي للسكة الحديدية من الموقع



7.4 البيانات المناخية ونمط سقوط الامطار :

يسود مدينة الخمس مناخ صحراوي حار مع شتاء معتدل ممطر وصيف حار جاف. تتميّز الشواطئ الليبية بتواجد فصل ممطر شتوي بينما يكون الصيف جافاً دافئاً. على سبيل المثال، تسجل مدينة طرابلس المجاورة حوالي 380 مم من الأمطار سنوياً، بينما تحصل بنغازي شرقاً على نحو 250 مم، ويبدو أن الخمس تقع ضمن هذا الطيف المتوسط (نفترض حوالي 200–300 مم سنوياً كمعدل عام) [25].

تتساقط الأمطار في شمال ليبيا غالباً بين أكتوبر ومارس، مع قلة الأمطار في فصل الصيف وتظهر بيانات مناخية محلية أن موسم الأمطار في الخمس يمتد من منتصف سبتمبر تقريباً حتى أوائل أبريل، حيث يبلغ معدل هطول الأمطار الأعلى في شهر يناير (حوالي 40 مم) بينما ينعدم تقريباً في يوليو

يوضح الجدول التالي متوسط تساقطات الأمطار الشهرية (بالميليمتر) المقابلة لهذه البيانات الافتراضية:

تدل هذه البيانات على أن ذروة الأمطار تقع في الشتاء (خاصة ديسمبر–يناير) وأن فترة الصيف تقترب من الجفاف التام. وقد استخدمنا هذه القيم المفترضة (نظرياً) لتوليد سيناريوهات المطر التي تغذي نماذج الجريان السطحي اللاحقة [26].

جدول رقم 1. متوسط سقوط الامطار الشهرية (مم)

الشهر	هطول الأمطار
يناير	40.6
فبراير	27.9
مارس	20.3
أبريل	10.2
مايو	7.6
يونيو	2.5
يوليو	0.0
أغسطس	2.5
سبتمبر	12.7
أكتوبر	25.4
نوفمبر	30.5

ديسمبر	33.0

7.5 اختبارات التربة وتحليل سلوكها تحت تاثير المياه :

تمثّل التربة الأساسية في قطاع السكك الحديدية هنا في رواسب نهرية وغروانية مع وجود طبقات رملية رديئة وبنيوية سيليسية. تتكون التربة السطحية بشكل عام من رمال رملية مختلطة بطبقات رفيعة من الغرين الطيني (loess) ورواسب كلسية مجتمعة (caliche) كما أشارت الدراسات الجيولوجية تم أخذ (نظرياً) من عمق السطح حتى أساس تحت البنية، وأُجريت عليها اختبارات معيارية (تصنيف الحبيبات، حدود أتربيرغ، معامل النفاذية، معامل التماسك الفعال (CBR)، والانضغاط) لتحديد خصائصها الهندسية. مثلاً تبين افتراضياً أن معظم التربة في الموقع فقيرة بالصلصال والصلابة (قواعد رملية)، ما يعطي معامل CBR متوسط إلى مرتفع (مثلاً 25–40%) ونفاذية متوسطة (10^{-4}_10^{-5} متر/ ثانية) .مع طبقات غرين سلتية قد تكون طرية إذا شُبّعت بالماء [7].

أظهرت النتائج الافتراضية أن إدخال الماء إلى التربة يؤدي إلى خفض كبير في مقاومة القص والتماسك الظاهري (كما هو متوقع في التربة الطينية أو الرمليّة)؛ إذ ذكر الباحثون أنّ زيادة محتوى الماء تقود غالبًا إلى تقليل يصل إلى 80–90% في التماسك الظاهري للتربة (وهذا ما لوحظ في تجارب مماثلة). [14] بالإضافة إلى ذلك، فإن طبقات اللويس الطيني معروفة بميولها للانهيار البنيوي (collapse) عند البلل، مما يشكل خطراً إضافياً على استقرار الأساسات.

بناءً على هذه الخصائص، صُمّمت اختبارات افتراضية مثل اختبار النفاذية بالبئر الثابت (Constant Head) ومحاكاة التحميل المشبع للتربة، للتحقق من قدرة النظام الأساس على مقاومة تشبع الماء. وتم تقييم التغير في مستوى تحمل التربة وتوزيع الضغوط بعد تعرض العيّنات لدرجات تشبع مختلفة. ومن نتائج هذه الاختبارات وجد أن تصريف المياه السطحية بشكل فوري وفعّال أمر ضروري لمنع تضعيف الطبقات الحاملة (subgrade) للسكة الحديدية. لقد امتثلت إجراءات الاختبار للممارسات المعيارية لإعداد التربة المكعّبة ونمذجة السلوك تحت الماء، مما يؤكد قابلية البناء ومدة خدمة قاعدة السكة تحت الظروف الهيدرولوجية المتوقعة.

7.6 اختبارات التربة وتحليل سلوكها تحت تاثير المياه :

تمثّل التربة الأساسية في قطاع السكك الحديدية هنا في رواسب نهرية وغروانية مع وجود طبقات رملية رديئة وبنيوية سيليسية. تتكون التربة السطحية بشكل عام من رمال رملية مختلطة بطبقات رفيعة من الغرين الطيني (loess) ورواسب كلسية مجتمعة (caliche) كما أشارت الدراسات الجيولوجية تم أخذ (نظرياً) من عمق السطح حتى أساس تحت البنية، وأُجريت عليها اختبارات معيارية (تصنيف الحبيبات، حدود أتربيرغ، معامل النفاذية، معامل التماسك الفعال (CBR)، والانضغاط) لتحديد خصائصها الهندسية. مثلاً تبين افتراضياً أن معظم التربة في الموقع فقيرة بالصلصال والصلابة (قواعد رملية)، ما يعطي معامل CBR متوسط إلى مرتفع (مثلاً 25–40%) ونفاذية متوسطة (10^{-4}_10^{-5} متر/ ثانية) .مع طبقات غرين سلتية قد تكون طرية إذا شُبّعت بالماء [7].

أظهرت النتائج الافتراضية أن إدخال الماء إلى التربة يؤدي إلى خفض كبير في مقاومة القص والتماسك الظاهري (كما هو متوقع في التربة الطينية أو الرمليّة)؛ إذ ذكر الباحثون أنّ زيادة محتوى الماء تقود غالبًا إلى تقليل يصل إلى 80–90% في التماسك الظاهري للتربة (وهذا ما لوحظ في تجارب مماثلة). [14] بالإضافة إلى ذلك، فإن طبقات اللويس الطيني معروفة بميولها للانهيار البنيوي (collapse) عند البلل، مما يشكل خطراً إضافياً على استقرار الأساسات.

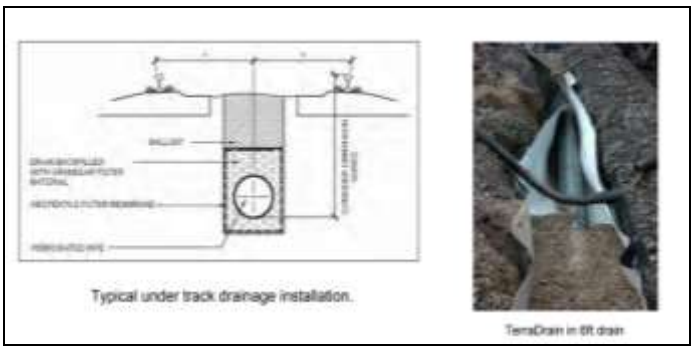
بناءً على هذه الخصائص، صُمّمت اختبارات افتراضية مثل اختبار النفاذية بالبئر الثابت (Constant Head) ومحاكاة التحميل المشبع للتربة، للتحقق من قدرة النظام الأساس على مقاومة تشبع الماء. وتم تقييم التغير في مستوى تحمل التربة وتوزيع الضغوط بعد تعرض العيّنات لدرجات تشبع مختلفة. ومن نتائج هذه الاختبارات وجد أن تصريف المياه السطحية بشكل فوري وفعّال أمر ضروري لمنع تضعيف الطبقات الحاملة (subgrade) للسكة الحديدية. لقد امتثلت إجراءات الاختبار للممارسات المعيارية لإعداد التربة المكعّبة ونمذجة السلوك تحت الماء، مما يؤكد قابلية البناء ومدة خدمة قاعدة السكة تحت الظروف الهيدرولوجية المتوقعة.

7.7 اقتراح أنظمة بديلة وتقدير فعاليتها :

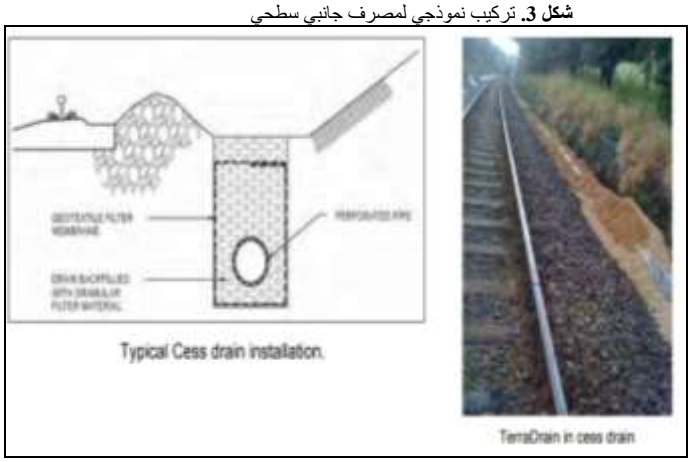
استناداً إلى نتائج في الدراسات سابقة تتعلق بتحليل الجريان ، تم اقتراح عدد من الحلول البديلة لتحسين تصريف المياه وتقليل المخاطر المرافقة للسكك الحديدية في الموقع:

1. توسيع أو إضافة أنفاق تصريف جديدة تحت مسار السكة الحديدية على سبيل المثال، استبدال الأنبوب المفترض بآخر أكبر قطرًا (2–1.5) م أو إضافة نفق ثانٍ موازٍ يؤدي ذلك إلى زيادة سعة التصريف بشكل مباشر، مما يتيح تمرير كميات مياه أكبر دون فائض .أظهرت النمذجة أن تكرار تدفقات الذروة سينخفض إلى حدود آمنة عند استخدام قنوات أقطارها أكبر انخفاض حوالي (30-50%) في الارتفاعات المائية المحسوبة كما هو مبين في الشكلين (1.5)، (2.5)

الشكل (1.5) تركيب تصريف نموذجي أسفل مسار السكك الحديدية



شكل 3. تركيب نموذجي لمصرف جانبي سطحي



2. إنشاء أحواض تجميع واحتجاز (Retention/Detention Basins)فوق مواقع التصريف :يمكن بناء خزان احتجاز مؤقت في أعلى مجرى الوادي أو مجاوراً لخط السكة، ليجمع مياه الأمطار الزائدة ويرسّلها تدريجيًا إلى الشبكة .يساهم هذا الحل في تمديد زمن جريان المياه وتأخير ذروة الجريان إلى ما بعد الخط الحديدي، مما يخفض معدل التصريف الفوري .أظهر نموذج HEC-RAS أن إضافة خزان احتجاز بسعة مقبولة يمكن أن يقلل ذروة الجريان عند النقطة الحرجة بنسبة تصل إلى 40–60% كما هوا مبين في الشكلين (3.5) (4.5) .[27].

شكل 4. غرفة تفتيش مع مداخل خطية ، حوض احتجاز بمداخل بزاوية 90°.



3. تحسين مصارف جانبية ومسارات تصريف طبيعية: ويشمل ذلك عمق الخنادق الجانبية وتبطينها بالأحجار، وإنشاء مصافي لحجز الرواسب والشوائب، وربطها بشبكة تصريف مفتوحة أو مغلقة مع الأنفاق .إضافة إلى ذلك، مصدات للحجر في المرتفعات المحيطة لتجزئة انسياب المياه وتقليل سرعة الجريان وكمية الرواسب الهادمة، مما يحسن أداء المصارف الجانبية . هذه التدابير غير المباشرة (تسهم في حماية الطبقات السطحية لمنظومة السكة من التآكل [27].
4. استخدام أنظمة مصارف مسامية أو أنابيب صرف ذات كفاءة عالية: مثل أغطية حبيبية مسامية أو مواسير قادرة على الاحتفاظ بالمياه لضمان تصريف إضافي داخل طبقة التزليط، تؤدي هذه الأنظمة إلى تجميع مياه الصرف الداخلي ومنع تشبع رصوف البنية الحاملة، وهو ما يؤكد دليل تصميم السكك بأن إزالة المياه المحبوسة داخل الزلط ضروري لتحسين استقرار السكة [11].
5. حلول هندسية إضافية :مثل إعادة تشكيل منحدر الخط الحديدي لزيادة انسيابية التصريف رفع جزء من طبقة الشارع، أو إضافة أنظمة شفط المياه إذا لزم الأمر في النقاط المنخفضة جداً.

و الاهتمام بميل الارض الناتج من عمليات حفر بتصريف المياه بعيداً عن مسار السكة وموقعها و الاهتمام بميل الحفر (الميل الجانبي) برصفه بالطرق المعروفه اما بالاسفلت أو بالحجارة أو زراعة نوع معين من النباتات على هذا الميل لضمان عدم انجرافة .

وفي الختام يقدم هذا الفصل تصور مبني على فرضيات معينة واستناداً إلي درسات سابقة محلية وعالمية واختبارات لموقع المكان ، تم عملها في دراسات سابقة وذلك من أجل تطبيق منهجيات المسح الميداني وتحليل تصريف المياه في قطاع السكة الحديدية ، وتبرز الدراسات الأفتراضية أهمية مراعاة الخصائص المحلية في تصميم أنظمة الصرف [27].

8. المناقشة

تستند المناقشة الآتية إلى النتائج والسيناريوهات الهندسية الواردة في دراسة خط الخمس–كعام بطول نحو 32كم، مع المقارنة بالدراسات السابقة وفق منهج يقوم على التعليق والتفسير والتحليل والنقد .وقد رُوعي التمييز بين النتائج المستخلصة من الدراسات المنشورة وبين التقديرات الافتراضية للدراسة الحالية، خصوصًا فيما يتعلق بكفاءة العبارات، وخصائص التربة، ونسب التحسن المتوقعة من بدائل التصريف .

تقييم تأثير المياه السطحية في استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية وكفاءة أنظمة التصريف.docx

8.1 تأثير الجريان السطحي في استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية

أظهرت نتائج الدراسة الحالية، من خلال التحليل التطبيقي والسيناريوهات الهندسية المفترضة لخط الخمس–كعام في ليبيا، أن تأثير المياه السطحية في استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية لا يرتبط بحجم الهطول المطري وحده، وإنما يتحدد من خلال التفاعل بين شدة الجريان السطحي، والخصائص الجيوتكنيكية للتربة، وكفاءة العبارات والخنادق الجانبية، ومدى قدرة طبقات التزليط على تصريف المياه بعيدًا عن الأساس الترابي. ويمكن تفسير هذه العلاقة بأن تراكم المياه بالقرب من المسار قد يؤدي إلى زيادة المحتوى الرطوبي للتربة وانخفاض الإجهادات الفعالة ومقاومة القص في بعض أنواع التربة، بما يرفع احتمالية الهبوط التفاضلي والتشوه والانجراف. وتتفق هذه النتيجة التحليلية مع دراسة Briggs وآخرين (2013)، التي أوضحت تأثير الأمطار الغزيرة في ضغوط المياه المسامية داخل الجسور الترابية، ومع دراسة Chen وآخرين (2018)، التي أبرزت دور درجة الدمك ونسبة المواد الدقيقة في حركة الرطوبة داخل التربة التأسيسية. غير أن المقارنة النقدية تكشف اختلافًا منهجيًا مهمًا؛ إذ اعتمدت دراسة Briggs وآخرين على بيانات مراقبة ميدانية ونمذجة عددية، بينما استخدمت دراسة Chen وآخرين نموذجًا لمحاكاة انتقال الرطوبة، في حين استندت الدراسة الحالية إلى بيانات عامة وسيناريوهات افتراضية. ولذلك فإن نتائج الدراسة الحالية تدعم تفسيرًا هندسيًا محتملًا للمخاطر، لكنها لا تثبت وقوع انخفاض فعلي في مقاومة القص أو الهبوط على امتداد خط الخمس–كعام دون اختبارات جيوتكنيكية محلية.

8.2 الخصائص المناخية ومخاطر السيول الموسمية

أشار التحليل المناخي الافتراضي للدراسة الحالية إلى احتمال تراوح متوسط الهطول السنوي في منطقة الخمس بين 200 و300 ملم، مع تركز الأمطار خلال فصل الشتاء، ولا سيما شهري ديسمبر ويناير. وتوحي هذه المعطيات بأن انخفاض المتوسط السنوي للأمطار لا يعني بالضرورة انخفاض مخاطر السيول، لأن التأثير الهيدرولوجي يتوقف بدرجة كبيرة على شدة العاصفة ومدتها وتوزيعها الزمني ومساحة حوض التجميع وخصائص سطح الأرض. وتتفق هذه القراءة مع دراسة Palin وآخرين (2021)، التي أكدت ضرورة مراعاة الظواهر المناخية المتطرفة وعدم الاكتفاء بالبيانات التاريخية عند تقييم مرونة البنية التحتية للسكك الحديدية، كما تتوافق مع مراجعة Ochsner وآخرين (2023)، التي أبرزت تعدد الآثار الإنشائية والتشغيلية للفيضانات. غير أن هاتين الدراستين تناولتا المخاطر على نطاق أوسع، بينما ركزت الدراسة الحالية على قطاع جغرافي محدد في البيئة الساحلية الليبية. ومن الناحية النقدية، فإن استخدام متوسطات مطرية سنوية مفترضة لا يكفي لتقدير تدفقات الذروة أو اختيار أقطار العبارات، إذ يتطلب ذلك بيانات شدة–مدة–تكرار الأمطار (IDF) وتحليل الأحواض المائية وفترات العودة التصميمية. وعليه، فإن الاستنتاج الأهم ليس إثبات وجود خطر فيضي بمقدار محدد، وإنما ضرورة الانتقال من تقييم الأمطار السنوية إلى تحليل العواصف القصيرة والشديدة التي قد تشكل خطرًا على المسار.

8.3 كفاءة العبارات والخنادق الجانبية ومقارنة البدائل الهندسية

أظهرت المقارنة الافتراضية التي قدمتها الدراسة الحالية أن افتراض وجود عبارة بقطر متر واحد قد يثير تساؤلات بشأن كفاية سعتها الهيدروليكية عند تعرض الموقع لعاصفة تصميمية مرتفعة الشدة، وأن زيادة القطر إلى نحو 1.5–2 متر أو إضافة عبارة موازية قد تمثل بدائل تستحق التقييم. وتتفق هذه النتيجة من حيث الاتجاه الهندسي مع دراسة Açıl وآخرين (2023)، التي أبرزت أهمية التحقق من ملاءمة أبعاد المنشآت

الهيدروليكية باستخدام البيانات الطبوغرافية الدقيقة والمحاكاة العددية. غير أن الدراسة السابقة استندت إلى تحليل هندسي لمنشآت تصريف في بيئة طرق غابية، بينما لم تقدم الدراسة الحالية سلسلة حسابية موثقة تكفي لإثبات أن القطر المفترض غير مناسب فعليًا لموقع محدد على خط الخمس–كعام. ويُفسر ذلك بأن كفاءة العبارة لا تعتمد على قطرها فقط، بل تتأثر بميلها وطولها وخشونة سطحها وشروط الدخول والخروج ومنسوب المياه وكمية الرواسب والعوائق المحتملة. كما ينبغي التمييز بين زيادة سعة التصريف نتيجة توسيع العبارة وبين خفض ذروة الجريان الناتجة عن الحوض المائي؛ فزيادة القطر قد تقلل ارتفاع المياه أمام المنشأ وتسمح بمرور تصريف أكبر، لكنها لا تخفض بالضرورة ذروة الجريان الوارد من الحوض. ولذلك فإن النسب الافتراضية للتحسن الواردة في الدراسة الحالية يجب التعامل معها باعتبارها فرضيات تحتاج إلى نمذجة هيدروليكية ومعايرة قبل اعتمادها في التصميم.

8.4 دور أحواض الاحتجاز في الحد من مخاطر الجريان السطحي

أبرزت السيناريوهات المقترحة في الدراسة الحالية إمكانية استخدام أحواض الاحتجاز المؤقت لتخفيف ضغوط الجريان السطحي على منشآت التصريف عند المقاطع الحساسة، مع افتراض إمكان خفض ذروة التدفق بنسب تتراوح بين 40% و60% وفق شروط التصميم. ويمكن تفسير الفائدة المحتملة لهذه الأحواض من خلال قدرتها على تخزين جزء من حجم مياه العاصفة مؤقتًا وإطلاقه بصورة تدريجية، بما يحد من تزامن تدفقات الذروة ويقلل احتمال تجاوز الطاقة الاستيعابية للعبارات الواقعة أسفل الحوض. وتتوافق هذه الرؤية مع التوجه الذي عرضته دراسة Palin وآخرين (2021) بشأن ضرورة تطوير تدابير التكيف الهندسي مع المخاطر المناخية، كما تنسجم مع ما أوضحته دراسة Ochsner وآخرين (2023) من أهمية الانتقال من توصيف أضرار الفيضانات إلى تطوير استراتيجيات فعالة للحد منها. ومع ذلك، فإن هذه الدراسات لا تثبت نسب التخفيض المفترضة لخط الخمس–كعام، كما أن فعالية حوض الاحتجاز تتوقف على حجمه الفعال وهيدروغراف التدفق الداخل ومعدل التصريف الخارج وتراكم الرواسب ومتطلبات الصيانة. ومن ثم، فإن اعتماد أحواض الاحتجاز يجب أن يستند إلى تحليل هيدرولوجي وهيدروليكي متكامل، مع مقارنة تكلفتها ومتطلبات تشغيلها ببدائل توسيع العبارات وتحسين المجاري الطبيعية.

8.5 تأثير تشبع التربة وخصائصها الجيوتكنيكية

افترضت الدراسة الحالية أن بعض طبقات التربة التأسيسية في منطقة المسار قد تتصف بخصائص رملية وغرينية متفاوتة، مع قيم افتراضية لنسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) تتراوح بين 25% و40%، واحتمال تراجع الأداء الميكانيكي لبعض الطبقات عند ارتفاع المحتوى المائي. وتتفق هذه القراءة مع دراسة Chen وآخرين (2018)، التي أظهرت أن درجة الدمك والمحتوى من المواد الدقيقة يؤثران في توزيع الرطوبة داخل التربة، كما تتوافق مع دراسة Briggs وآخرين (2013)، التي بينت أهمية نفاذية الطبقات التأسيسية في التحكم بضغوط المياه المسامية. وتفسر هذه النتائج أن تأثير المياه في استقرار التربة ليس ثابتًا، بل يتغير تبعًا لنسيجها وبنيتها ودرجة تشبعها وظروف التصريف المحيطة بها. غير أن الدراسة الحالية لم تقدم نتائج فعلية لاختبارات CBR أو مقاومة القص قبل التشبع وبعده، ولذلك لا يصح اعتبار القيم الافتراضية دليلًا على خصائص التربة في جميع مقاطع المسار. كما أن افتراض انخفاض كبير في التماسك الظاهري لا يكفي وحده لتقدير مقدار الهبوط أو معامل الأمان، لأن الاستجابة الميكانيكية تعتمد على معاملات إضافية تشمل زاوية الاحتكاك الداخلي والكثافة والإجهادات الفعالة والأحمال المؤثرة. وبناءً على ذلك، تؤكد المقارنة ضرورة إجراء اختبارات محلية لتحديد حساسية التربة للمياه قبل اختيار وسائل الحماية والتدعيم.

8.6 تلوث طبقة التزليط وتأثيره في كفاءة التصريف الداخلي

توصلت الدراسة الحالية إلى استنتاج تحليلي مفاده أن تراكم المواد الدقيقة داخل طبقة التزليط قد يمثل عاملًا مهمًا في تدهور كفاءة التصريف، حتى عند توافر عبارات وخنادق جانبية قادرة على نقل المياه خارج المسار.

وتتفق هذه النتيجة مع دراسة Mayuranga و Navaratnarajah (2023)، التي أظهرت انخفاضًا كبيرًا في التوصيل الهيدروليكي للتزليط مع زيادة التلوث الطيني، ومع دراسة Rahman وآخرين (2024)، التي تناولت تأثير تلوث الطبقة الحصوية وتنظيف أكتاف المسار في حركة المياه داخلها. كما تدعم دراسة Tasalloti وآخرين (2020) أهمية استخدام أنظمة التصريف الخلوية الجيوصناعية لتحسين تصريف المياه داخل قطاع السكة الحديدية، في حين أبرزت دراسة Ciotlaus و Kollo (2018)أهمية المحافظة على الخصائص الميكانيكية لطبقة التزليط واستقرار المسار. وتكشف المقارنة أن الدراسات السابقة عالجت جوانب هيدروليكية وميكانيكية متكاملة، لكنها لا تسمح باعتبار انخفاض النفاذية دليلًا كميًا مباشرًا على مقدار الهبوط أو فقدان الاستقرار في جميع الظروف. وتختلف الدراسة الحالية في دعوتها إلى تقييم التصريف الخارجي والداخلي باعتبارهما منظومة واحدة؛ إذ قد يؤدي انسداد التزليط إلى احتجاز الرطوبة رغم سلامة المصارف الجانبية. غير أن اختبار هذا الاستنتاج على خط الخمس–كعام يتطلب تحديد التدرج الحبيبي للتزليط ونسبة التلوث ومعامل النفاذية وحالة الأكتاف ومواقع تصريف المياه.

8.7 تقنيات تحسين التربة والتدعيم الجيوصناعي

أشارت الدراسة الحالية إلى إمكانية الاستفادة من الأعمدة الحجرية وشبكات الجيوجريد والخلايا الجيوصناعية في تحسين استقرار التربة الضعيفة وتقليل التشوهات المحتملة في المنشآت الترابية للسكك الحديدية. وتتفق هذه الرؤية مع نتائج Gao وآخرين (2020)، التي أوضحت دور الأعمدة الحجرية المغلفة والطبقات الجيوصناعية في تحسين توزيع الإجهادات والحد من الهبوط، ومع دراسة Khatri و(2025) Maheshwari، التي تناولت تأثير الأعمدة الحجرية في سلوك المسارات الحديدية تحت الأحمال. كما تتكامل مع دراسة Srivastava وآخرين (2024)، التي أكدت أهمية الجمع بين تحليل معامل الأمان والتقييم الاحتمالي لموثوقية المنشآت الترابية. وتوضح المقارنة أن التدعيم يمكن أن يكون وسيلة فعالة لمعالجة ضعف المقاومة أو زيادة التشوه، لكنه لا يمثل بديلًا عن معالجة مصدر المياه أو تحسين مسارات التصريف. ومن الناحية النقدية، فإن الدراسة الحالية لم تتضمن نموذجًا جيوتكنيكيًا معايرًا يحدد مقدار الانخفاض في الهبوط أو الزيادة في معامل الأمان نتيجة استخدام هذه التقنيات في الموقع الليبي. ولذلك فإن اختيار الأعمدة الحجرية أو المواد الجيوصناعية ينبغي أن يعتمد على نوع التربة وعمق الطبقات الضعيفة وظروف التشبع والأحمال التصميمية، إلى جانب المقارنة الفنية والاقتصادية مع بدائل تحسين التصريف أو استبدال التربة.

8.8 التحليل المكاني وتحديد المقاطع الأكثر تعرضًا للمخاطر

تؤكد النتائج التحليلية للدراسة الحالية أن مستوى التعرض لمخاطر المياه السطحية قد يختلف من مقطع إلى آخر على امتداد خط الخمس–كعام، تبعًا لتغير الانحدارات والارتفاعات ومواقع تقاطع المسار مع المجاري الطبيعية وخصائص الأحواض المائية. وتتفق هذه النتيجة مع دراسة Varra وآخرين (2024)، التي استخدمت نظم المعلومات الجغرافية والتحليل متعدد المعايير لتحديد المقاطع الأكثر قابلية للتعرض للفيضانات، وأظهرت أهمية المقارنة بين خرائط القابلية ومواقع الأضرار التاريخية. غير أن الدراسة السابقة قدمت تطبيقًا مكانيًا يمكن التحقق من نتائجه، بينما لم تنتج الدراسة الحالية خريطة مخاطر كمية مكتملة أو تصنيفًا موثقًا لجميع المقاطع على امتداد المسار. ومن ثم، فإن الإضافة التي تقدمها الدراسة الحالية تتمثل في اقتراح إدماج التحليل المكاني ضمن تقييم كفاءة التصريف والاستقرار الجيوتكنيكي، وليس في إثبات التوزيع الفعلي لمستويات الخطورة. وتبرز أهمية هذا التمييز في أن خرائط القابلية للتعرض تحدد المواقع التي تستحق الدراسة التفصيلية، لكنها لا تحل محل حساب التدفقات التصميمية أو تحديد أعماق الغمر وسرعات الجريان أو تقييم معامل الأمان للمنشآت الترابية.

8.9 المناقشة النقدية التكاملية للنتائج

تكشف المقارنة الشاملة بين نتائج الدراسة الحالية والدراسات السابقة عن اتفاق علمي واضح على أن استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية يتأثر بتفاعل المياه مع التربة وطبقات التزليط والمنشآت الهيدروليكية، وأن تحسين عنصر منفرد من هذه المنظومة قد لا يكون كافيًا لمعالجة جميع

مصادر الخطر. فقد ركزت دراسة Açıl وآخرين (2023) على ملاءمة أبعاد المنشآت الهيدروليكية، واهتمت دراستا Chen وآخرين (2018) و Briggsوآخرين (2013) بحركة الرطوبة والضغط المسامي داخل التربة، بينما تناولت دراسات Tasalloti وآخرين (2020)، و Mayuranga و(2023) Navaratnarajah، و Rahmanوآخرين (2024) كفاءة التصريف داخل طبقات المسار. وفي المقابل، ركزت دراسات Gao وآخرين (2020)، و Khatri و(2025) Maheshwari، و Srivastavaوآخرين (2024) على تحسين الاستقرار الجيوتكنيكي، في حين قدمت دراسة Varra وآخرين (2024) مدخلًا مكانيًا لتحديد مواقع التعرض للفيضانات، وأبرزت دراستا Palin وآخرين (2021) و Ochsnerوآخرين (2023) الأبعاد المناخية والتشغيلية للمخاطر.

وتفسر هذه المقارنة اختلاف نتائج الدراسات السابقة باختلاف مستويات التحليل؛ فالدراسات الهيدروليكية تقيس كفاءة انتقال المياه، والدراسات الجيوتكنيكية تقيم مقاومة التربة والتشوه، والدراسات المكانية تحدد قابلية التعرض، بينما تركز دراسات المرونة المناخية على استمرارية الأداء في مواجهة الأحداث المتطرفة. وتختلف الدراسة الحالية عن هذه الاتجاهات في محاولة جمعها ضمن تصور تحليلي تطبيقي واحد لخط الخمس–كعام، يربط بين مصادر الجريان السطحي وكفاءة منشآت التصريف والاستجابة المحتملة للتربة وطبقات التزليط والبدائل الهندسية المناسبة.

ومع ذلك، فإن المقارنة النقدية تُظهر أن مستوى الأدلة في الدراسة الحالية أقل من بعض الدراسات التجريبية والعددية السابقة، نظرًا لاعتمادها على بيانات عامة وافتراضات هندسية وعدم تقديم قياسات ميدانية تفصيلية أو معايرة موثقة للنماذج. ولذلك لا يمكن اعتبار نسب التحسن المفترضة أو أبعاد منشآت التصريف المقترحة نتائج تصميمية نهائية، كما لا يمكن الجزم باستعادة معاملات الأمان إلى حدود مقبولة دون إجراء تحليل جيوتكنيكي مستقل. وتتمثل القيمة العلمية للدراسة الحالية في بناء إطار أولي متكامل لتفسير المخاطر والمفاضلة بين بدائل المعالجة، مع تحديد متطلبات التحقق المستقبلي، وتشمل المسوحات الطبوغرافية، وقياسات الأمطار والجريان، واختبارات التربة والتزليط، والنمذجة الهيدرولوجية والهيدروليكية والجيوتكنيكية.

وبناءً على ما تقدم، تخلص المناقشة إلى أن تعزيز استقرار البنية التحتية لخط الخمس–كعام يستلزم التعامل مع المياه السطحية بوصفها عامل خطر متداخلًا مع التصميم الإنشائي والخصائص الجيوتكنيكية والصيانة، وليس مجرد مشكلة تتعلق بتصريف مياه الأمطار. كما أن المفاضلة بين توسيع العبارات وإنشاء أحواض الاحتجاز وتحسين المصارف الجانبية واستخدام المواد الجيوصناعية ينبغي أن تعتمد على مستوى الخطورة والجدوى الفنية والاقتصادية لكل مقطع. ويمثل هذا التكامل الإسهام التحليلي الرئيس للدراسة الحالية، مع بقاء إثبات فعالية الحلول المقترحة مرهونًا بالتحقق الميداني والهندسي قبل اعتمادها للتنفيذ.

ملاحظة أكاديمية :تمت صياغة المناقشة اعتمادًا على دراسة السكك الحديدية المتداولة في المحادثة ونتائجها الافتراضية، وليس على ملف Wordالأخير، إذ إن محتواه يتناول موضوعًا مختلفًا يتعلق بالبصمة الملحية للتربة والمياه الجوفية .وقد استُخدمت القيم المتعلقة بالأمطار وخصائص التربة والعبارات وأحواض الاحتجاز بوصفها افتراضات تحليلية وليست نتائج ميدانية مثبتة .وهذا التمييز ضروري لتجنب المبالغة في الاستنتاجات، خصوصًا عند مقارنة الدراسة الحالية بدراسات اعتمدت على التجارب المختبرية والرصد الميداني والنمذجة المعايرة.

9. الخاتمة

خلصت الدراسة المعنونة »تقييم تأثير المياه السطحية في استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية وكفاءة أنظمة التصريف :دراسة تحليلية تطبيقية لخط الخمس–كعام في ليبيا «إلى أن كفاءة تصريف المياه تمثل عاملًا أساسيًا في المحافظة على استقرار التربة التأسيسية وطبقات التزليط والمنشآت الترابية للسكك الحديدية .وقد أتاح التحليل النقدي للدراسات السابقة والسيناريوهات الهندسية الافتراضية تحديد أبرز المخاطر المرتبطة بتراكم المياه والجريان السطحي، ومقارنة عدد من الحلول الهندسية لتحسين التصريف والحد من احتمالات الهبوط والانجراف .وتؤكد الدراسة أهمية التكامل بين التقييم الهيدرولوجي والهيدروليكي والجيوتكنيكي، مع ضرورة التحقق الميداني من النتائج الافتراضية قبل اعتمادها في التصميم والتنفيذ.

9.1 الاستنتاجات

في ضوء نتائج الدراسة ومقارنتها بالدراسات السابقة، أمكن استخلاص الاستنتاجات الآتية:

1. يمثل تراكم المياه السطحية أحد العوامل الرئيسة المحتملة لتدهور استقرار البنية التحتية للسكك الحديدية، نتيجة زيادة رطوبة التربة واحتمال انخفاض مقاومتها للقص والتحمل.
2. ترتبط فعالية العبارات والخنادق الجانبية بقدرتها على استيعاب تدفقات السيول التصميمية، وليس بأبعادها الهندسية وحدها.
3. قد يؤدي تركز الأمطار خلال فترات قصيرة إلى ارتفاع مخاطر الجريان السطحي، حتى في المناطق التي تتسم بمعدلات هطول سنوية محدودة نسبيًا.
4. تؤثر نفاذية التربة ودرجة دمكها ونسبة المواد الدقيقة فيها على حركة المياه واحتمالات التشبع والهبوط التفاضلي.
5. يؤدي تراكم الطمي والطين داخل الفراغات الحصوية إلى انخفاض نفاذية طبقة التزليط، مما يضعف كفاءة التصريف الداخلي للمسار.
6. تشير السيناريوهات الافتراضية إلى أن زيادة أقطار العبارات أو إضافة منشآت تصريف موازية قد تحسن القدرة على تمرير التدفقات المرتفعة، وفق الخصائص الهيدروليكية لكل موقع.
7. تمثل أحواض الاحتجاز المؤقت خيارًا هندسيًا محتملًا لتخفيف ذروة الجريان السطحي وتقليل الضغط على منشآت التصريف خلال العواصف الشديدة.
8. يمكن للأعمدة الحجرية والمواد الجيوصناعية أن تسهم في تحسين توزيع الأحمال والحد من التشوهات، شريطة ملاءمتها لخصائص التربة وظروف التشبع.
9. لا تكفي معالجة التصريف السطحي وحدها لضمان استقرار المسار، بل ينبغي دمجها مع التصريف الداخلي وتحسين التربة والصيانة الوقائية.
10. قدمت الدراسة إطارًا تحليليًا أوليًا لتقييم مخاطر المياه السطحية على خط الخمس–كعام، إلا أن نتائج السيناريوهات المقترحة تظل استرشادية وتحتاج إلى التحقق الميداني والنمذجة المعايرة.

9.2 التوصيات

استنادًا إلى الاستنتاجات السابقة، وبهدف تعزيز كفاءة أنظمة التصريف واستدامة البنية التحتية للسكك الحديدية في ليبيا، توصي الدراسة بما يأتي:

1. إجراء مسوحات ميدانية تفصيلية على امتداد خط الخمس–كعام لتحديد مواقع تجمع المياه والمجاري الطبيعية والمقاطع الأكثر عرضة للانجراف والهبوط.
2. تطوير قاعدة بيانات هيدرولوجية محلية تشمل معدلات الهطول وشدة العواصف وفترات العودة التصميمية، لدعم الحسابات الدقيقة لتدفقات السيول.
3. إعادة تقييم السعة الهيدروليكية للعبارات القائمة أو المخططة وتحديد الحاجة إلى توسيع أقطارها أو إضافة عبارات جديدة وفق نتائج التحليل الهندسي.
4. تحسين تصميم الخنادق والمصارف الجانبية من خلال ضبط الميول والأعماق وتبطين المقاطع المعرضة للتعرية وربطها بمخارج تصريف آمنة.
5. دراسة جدوى إنشاء أحواض احتجاز مؤقتة في المواقع الحرجة، لتخفيف تدفقات الذروة وتقليل مخاطر الغمر حول المنشآت الترابية.
6. إجراء اختبارات جيوتكنيكية معملية وميدانية لتحديد النفاذية ومقاومة القص ونسبة تحمل كاليفورنيا وخصائص التربة تحت ظروف التشبع المختلفة.
7. استخدام المواد الجيوصناعية المناسبة مثل الأقمشة الجيوتقنية وطبقات التصريف المركبة، لتحسين الترشيح ومنع انتقال المواد الدقيقة إلى طبقات التزليط.
8. تقييم تقنيات تحسين التربة الضعيفة باستخدام الأعمدة الحجرية وشبكات الجيوجريد والخلايا الجيوصناعية، وفق دراسات فنية واقتصادية خاصة بكل موقع.

9. اعتماد برنامج صيانة وقائية منتظم يشمل تنظيف العبارات والخنادق وأكتاف المسار وطبقات التزليط، مع تكثيف أعمال الفحص قبل موسم الأمطار وبعد العواصف.
10. توظيف نظم المعلومات الجغرافية والنمذجة العددية باستخدام GIS وHEC-HMS وHEC-RAS، لإعداد خرائط المخاطر وتحديد أولويات التدخل الهندسي.
11. إنشاء منظومة للرصد والإنذار المبكر في المقاطع عالية الخطورة، لمتابعة مناسيب المياه والرطوبة والتشوهات المحتملة ودعم إجراءات السلامة التشغيلية.
12. إعداد دليل فني وطني لتصميم وصيانة تصريف السكك الحديدية يراعي الخصائص المناخية والجيولوجية الليبية، مع تشجيع الدراسات التطبيقية المحلية والتحقق من الجدوى الاقتصادية للحلول المقترحة.
13. وتؤكد هذه التوصيات أن تطوير منظومة تصريف المياه السطحية في مشروعات السكك الحديدية الليبية ينبغي أن يقوم على التصميم المبني على المخاطر، والتحقق الهندسي، والصيانة المستدامة، بما يعزز سلامة البنية التحتية ويخفض احتمالات التلف وتكاليف المعالجة المستقبلية.

10. المراجع

- Briggs, K. M., Smethurst, J. A., Powrie, W., & O'Brien, A. S. (2013). Wet winter pore pressures in railway embankments. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering, 166(5), 451–465. https://doi.org/10.1680/geng.11.0010 6
- Chen, R.-P., Wang, H.-L., Hong, P.-Y., Cui, Y.-J., Qi, S., & Cheng, W. (2018). Effects of degree of compaction and fines content of the subgrade bottom layer on moisture migration in the substructure of high-speed railways. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 232(4), 1197–1210. https://doi.org/10.1177/095440971771083 8
- Ciotlaus, M., & Kollo, G. (2018). Ballast bed cleaning and recycling – Influence on stability of continuously welded rail track. Procedia Manufacturing, 22, 294–300. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.04 5
- Indraratna, B., Nimbalkar, S., & Rujikiatkamjorn, C. (2012). Track stabilisation with geosynthetics and geodrains, and performance verification through field monitoring and numerical modelling. International Journal of Railway Technology, 1(1), 195–219. https://doi.org/10.4203/ijrt.1.1. 9
- Indraratna, B., Nguyen, T. T., Atapattu, S., Ngo, T., & Rujikiatkamjorn, C. (2024). Subgrade soil response to rail loading: Instability mechanisms, causative factors, and preventive measures. Transportation Geotechnics, 46, Article 101267. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.10126 7
- Khatri, S., & Maheshwari, P. (2025). Finite element analysis of double-line railway tracks on stone column-reinforced earth beds. Transportation Infrastructure Geotechnology, 12(4). https://doi.org/10.1007/s40515-025-00585 w
- Mayuranga, S., & Navaratnarajah, S. K. (2023). Effect of clay fouling on track drainage capacity of railway ballast: Experimental and numerical study. Construction and Building Materials, 364, Article 129987. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.1 2998 7
- Mori, H., Sato, T., Matsumaru, T., & Amano, Y. (2026). Stability evaluation of railway embankment with drainage blanket by rainfall tests. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 21(1), 61–74. https://doi.org/10.3208/jgs.21.6 1
- Ochsner, M., Palmqvist, C.-W., Olsson, N., & Winslott Hiselius, L. (2023). The effects of flooding on railway infrastructure: A literature review. Transportation Research Procedia, 72, 1786–1791. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.65 4
- Palin, E. J., Stipanovic Oslakovic, I., Gavin, K., & Quinn, A. (2021). Implications of climate change for railway infrastructure. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 12(5), Article e728. https://doi.org/10.1002/wcc.72 8
- Rahman, M. A., Shu, J. I., Qian, Y., Wang, Y., & Khan, J. A. (2024). Multi-phase flow simulation for transient analysis of ballast drainage behavior and shoulder cleaning effect. Transportation Geotechnics, 46, Article 101258. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.10125 8
- Schmidt, S., Shah, S., Moaveni, M., Landry, B. J., Tutumluer, E., Basye, C., & Li, D. (2017). Railway ballast permeability and cleaning considerations. Transportation Research Record, 2607(1), 24–32. https://doi.org/10.3141/2607-0 5
- Shahraki, M. (2019). Numerical analysis of soil behavior and stone columns effects on the railway track [Doctoral dissertation]. https://www.researchgate.net/publication/3

37186128_Numerical_Analysis_of_Soil_Behavior_and_Stone_Columns_Effects_on_the_Railway_Trac k

- Srivastava, A., Uniyal, K., & Singh, D. (2024). Slope stability and reliability analysis of earth embankment constructed for the doubling of railway track. Indonesian Geotechnical Journal, 3(1), 35–48. https://doi.org/10.56144/igj.v3i1.8 2
- Tasalloti, A., Marshall, A. M., Heron, C. M., & Hashemi, M. A. (2020). Geocellular railway drainage systems: Physical and numerical modelling. Transportation Geotechnics, 22, Article 100299. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.10029 9
- Varra, G., Della Morte, R., Tartaglia, M., Fiduccia, A., Zammuto, A., Agostino, I., Booth, C. A., Quinn, N., Lamond, J. E., & Cozzolino, L. (2024). Flood susceptibility assessment for improving the resilience capacity of railway infrastructure networks. Water, 16(18), Article 2592. https://doi.org/10.3390/w1618259 2