

ANALISIS GEOTEKNIK DAN DINAMIK STRUKTUR UNTUK PERKUATAN ABUTMEN JEMBATAN WAY PAGAR ALAM YANG LONGSOR

GEOTECHNICAL AND STRUCTURAL DYNAMICS ANALYSIS FOR ABUTMENT REINFORCEMENT OF THE WAY PAGAR ALAM BRIDGE FAILURE

Aminudin Syah¹, Fikri Alami^{2*}, Ofik Taupik Purwadi³, Endro Prasetyo Wahono⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

^{*}) Email: fikri.alami@eng.unila.ac.id

Informasi Naskah:

Diterima:
07 November 2025

Diterbitkan:
24 Desember 2025

Abstract: The Way Pagar Alam Bridge in Tanggamus Regency experienced failure at one of its widened abutments due to a combination of weak geotechnical conditions, rainfall infiltration, and riverbank erosion. This study aims to assess the structural and geotechnical conditions of the bridge and develop an effective reinforcement design. The methodology includes visual inspection, laboratory testing of soil, structural vibration monitoring, and slope stability analysis using limit equilibrium-based software. Vibration tests indicate that the bridge superstructure remains stiff, with vertical deflection well below the allowable limit. Subsurface investigations revealed the presence of expansive clay with low bearing capacity in shallow layers. Stability analysis shows that a combined reinforcement system comprising a retaining wall, gabion protection, and mini piles can enhance the slope safety factor to 1.99 (static) and 1.73 (dynamic), meeting applicable engineering standards. The proposed design is considered effective and applicable for bridge rehabilitation in tropical regions with soft subgrade conditions.

Keyword: bridge, slope stability, reinforcement, HYRCAN

Abstrak: Jembatan Way Pagar Alam di Kabupaten Tanggamus mengalami keruntuhan pada salah satu abutmen hasil pelebaran akibat kombinasi kondisi geoteknik lemah, infiltrasi air hujan, dan gerusan aliran sungai. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kondisi struktur dan tanah di sekitar jembatan serta merancang sistem perkuatan yang efektif. Metode yang digunakan mencakup pengamatan lapangan, survei dan investigasi geoteknik, uji getaran struktur, serta analisis stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak berbasis keseimbangan batas. Hasil uji getar menunjukkan struktur atas jembatan masih kaku dengan defleksi vertikal berada di bawah batas izin. Investigasi tanah mengungkapkan lapisan lempung ekspansif dengan daya dukung rendah di kedalaman dangkal. Analisis stabilitas menunjukkan bahwa kombinasi dinding penahan tanah (DPT), bronjong, dan mini pile meningkatkan faktor keamanan lereng menjadi 1,99 (statis) dan 1,73 (dinamis), sesuai standar teknis. Desain ini dinilai efektif dalam mengatasi keruntuhan dan dapat menjadi acuan untuk rehabilitasi jembatan di wilayah bertanah lunak tropis.

Kata Kunci: jembatan, stabilitas lereng, perkuatan, HYRCAN

PENDAHULUAN

Ketahanan jembatan terhadap beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan menjadi isu strategis seiring bertambahnya usia infrastruktur dan meningkatnya intensitas cuaca ekstrem dalam dekade terakhir [1]; [2]. Keruntuhan lokal baik pada elemen struktur maupun fondasi dapat memutus jaringan logistik dan membahayakan keselamatan pengguna jalan. Studi-studi terkini menekankan pentingnya pendekatan terpadu yang melibatkan mekanika tanah, hidrologi, dan rekayasa struktur untuk menilai kerentanan jembatan [3]; [4].

Jembatan Way Pagar Alam di Jalan Karang Rejo, Kecamatan Ulubelu, Kabupaten Tanggamus, Lampung, yang memiliki bentang 12 m dan lebar 6,45 m termasuk trotoar 0,85 m di setiap sisi mengalami kerusakan pasca hujan lebat. Abutmen hasil pelebaran mengalami longsor sehingga kapasitas dukung tanah berkurang drastis dan sambungan struktur lama-baru retak. Kegagalan serupa telah banyak dilaporkan pada jembatan dengan tanah dasar lempung lunak-sedang di seluruh Asia Tenggara, terutama akibat kombinasi beban lalu lintas, ekspansi-susut musiman, dan gerusan sungai [5]; [6].

Penurunan kekuatan geser pada lempung berkadar montmorillonit tinggi dapat mencapai 40% setelah siklus basah-kering tiga musim [7]; [8]. Tanah jenis ini memiliki nilai potensi pengembangan tinggi yang menyebabkan ketidakstabilan lereng dan deformasi lateral abutmen [9]; [10]. Infiltrasi air hujan meningkatkan tekanan pori, sedangkan gerusan aliran terutama pada tikungan mengikis kaki abutmen dan menyebabkan hilangnya penopang lateral [11]. Retakan pada lempung akibat sifat kembang-susut yang tinggi terbukti mempercepat infiltrasi hujan secara mendalam melalui jalur preferensial, sehingga menurunkan faktor keamanan lereng hingga 13,4% dan memicu longsor melalui mekanisme bertahap mulai dari pembentukan retakan hingga kegagalan lereng akhir [12].

Analisis limit equilibrium modern yang terintegrasi dalam perangkat lunak HYRCAN 22, PLAXIS LE, dan SLOPE/W memudahkan simulasi variasi muka air dan parameter tidak jenuh [13]; [14]; [15]. Metode perkuatan terkini untuk abutmen jembatan mencakup kombinasi bronjong, dinding penahan tanah (DPT), dan mini pile. Studi eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa konfigurasi ini mampu meningkatkan faktor keamanan lereng dibanding metode konvensional [16]; [17]. Penggunaan bronjong terbukti efektif dalam mereduksi kecepatan aliran, menurunkan kedalaman gerusan maksimum dan ramah lingkungan [18]. Mini pile berfungsi meningkatkan kekakuan lateral fondasi serta menahan gaya geser akibat deformasi lateral tanah.

Selain pendekatan geoteknik dan struktural, pemantauan dinamis jembatan melalui uji getar sistem juga digunakan untuk menilai integritas struktur. Uji getaran dengan akselerometer nirkabel dan truk bermassa tetap memungkinkan deteksi perubahan frekuensi alami akibat degradasi kekakuan [19]; [20]. Nilai defleksi vertikal akibat beban dinamis dibandingkan terhadap batas $L/800$ – $L/1000$ sesuai rekomendasi standar pelayanan struktur jembatan.

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, kajian ini mengintegrasikan survei geoteknik, pengujian laboratorium tanah, analisis stabilitas lereng berbasis perangkat lunak HYRCAN 22, uji getaran sistem jembatan, serta desain perkuatan gabungan. Hasil kajian diharapkan menjadi rujukan teknik rehabilitasi jembatan di wilayah bertanah lempung lunak dan beriklim tropis, sekaligus memperkaya literatur terkait sistem pemantauan dan perkuatan berbasis analisis integratif.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi eksisting Jembatan Way Pagar Alam yang mengalami keruntuhan pada salah satu abutmennya dan untuk merancang sistem perkuatan

yang sesuai berdasarkan karakteristik geoteknik, struktur, dan hidrologi setempat. Jembatan ini berada di Kecamatan Ulubelu, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung dengan koordinat 5° 20' 06,7153" LS dan 104° 34' 46,3792" BT. Metode yang digunakan mencakup survei lapangan, pengujian laboratorium, dan analisis numerik berbantuan perangkat lunak. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman menyeluruh terhadap penyebab keruntuhan dan efektivitas rancangan perkuatan.

Kegiatan survei lapangan dilakukan untuk memperoleh data primer mengenai kondisi aktual struktur jembatan dan karakteristik tanah di lokasi keruntuhan. Observasi visual dilakukan terhadap elemen struktur atas seperti pelat lantai, balok utama, sambungan ekspansi, dan elemen penyangga. Tujuan dari pengamatan ini adalah untuk mengidentifikasi indikasi kerusakan, seperti retak, korosi, deformasi, serta gejala ketidakstabilan lain pada sambungan antara struktur lama dan hasil pelebaran. Pengamatan lebih lanjut difokuskan pada area abutmen yang mengalami longsor. Dokumentasi dilakukan untuk mencatat karakteristik morfologi longsor, arah retakan, dan hubungan antara lereng dan aliran sungai di sekitarnya.

Pengukuran geometri struktur dilakukan pada bagian atas dan bawah jembatan untuk mendapatkan dimensi aktual bentang, lebar, tinggi abutmen, dan kemiringan lereng. Data ini digunakan sebagai input dalam pemodelan numerik struktur dan stabilitas lereng. Untuk memperoleh data geoteknik, dilakukan pengambilan sampel tanah tak terganggu (*undisturbed*) di dua titik sekitar lokasi longsor. Sampel diuji di laboratorium untuk menentukan sifat fisik dan mekanik tanah, seperti kadar air, batas Atterberg, berat jenis, dan parameter geser melalui uji geser langsung dan konsolidasi.

Sebagai pelengkap, dua titik uji sondir (*Cone Penetration Test/CPT*) dilakukan di

sekitar abutmen jembatan. Data tahanan konus (q_c) yang diperoleh digunakan untuk menentukan kedalaman lapisan tanah keras dan kapasitas dukung tanah. Selain itu, dilakukan pula pengujian getaran struktur jembatan dengan memasang akselerometer pada lantai jembatan. Pengujian dilakukan dalam dua kondisi, yaitu tanpa beban dan saat dilewati truk berbobot 18 ton. Hasil pengujian digunakan untuk memperoleh frekuensi alami dan defleksi vertikal jembatan guna mengevaluasi kekakuan struktural serta mendeteksi potensi penurunan performa.

Analisis numerik dilakukan dalam dua pendekatan. Pertama, analisis stabilitas lereng di sekitar abutmen dilakukan menggunakan perangkat lunak HYRCAN 22 yang berbasis metode keseimbangan batas. Model lereng dibangun berdasarkan hasil uji sondir dan laboratorium, dengan mempertimbangkan dua skenario: tanpa perkuatan dan dengan kombinasi perkuatan berupa bronjong, dinding penahan tanah (DPT), dan mini pile. Data hasil uji getar digunakan untuk memvalidasi kekakuan model numerik terhadap kondisi lapangan.

Kombinasi pendekatan survei, laboratorium, dan pemodelan numerik ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif terhadap penyebab kegagalan dan efektivitas rancangan perkuatan pada jembatan yang terletak di wilayah bertanah lempung lunak dengan kondisi hidrologi aktif.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Investigasi Lapangan dan Uji Material

Investigasi lapangan dilakukan secara menyeluruh untuk memperoleh gambaran kondisi eksisting jembatan Way Pagar Alam pascakegagalan abutmen. Pengamatan visual menunjukkan bahwa bagian abutmen hasil pelebaran mengalami keruntuhan, dengan retakan signifikan pada sambungan struktur lama dan baru (Gambar 1). Retakan ini menandakan adanya deformasi lateral

akibat berkurangnya dukungan tanah di bawah fondasi.



Gambar 1. Retakan pada sambungan abutmen lama dan baru sesaat sebelum longsor

Uji getar sistem jembatan dilaksanakan menggunakan akselerometer yang dipasang pada sistem lantai jembatan. Pengujian dilakukan dalam dua kondisi: tanpa beban kendaraan dan dengan beban truk 18 ton yang melintasi jembatan. Hasil menunjukkan frekuensi alami sebesar 15,74 Hz (tanpa beban) dan 15,67 Hz (dengan beban), dengan defleksi vertikal masing-masing sebesar 0,0692 mm dan 0,087 mm. Perbedaan frekuensi sebesar 0,44% menunjukkan bahwa sistem jembatan masih mempertahankan kekakuannya, dan estimasi defleksi akibat beban truk 30 ton masih berada jauh di bawah batas yang diizinkan menurut AASHTO ($L/800 \approx 15$ mm), yakni hanya sebesar 0,145 mm.

Dari sisi geoteknik, dua titik uji sondir (S1 dan S2 pada Gambar 2) menunjukkan bahwa tanah di sekitar abutmen terdiri dari lempung sangat lunak hingga sedang pada kedalaman 0-4 m, dan lapisan keras diperoleh pada kedalaman lebih dari 5 m. Hasil laboratorium pada dua sampel tanah (TP1 dan TP2) menunjukkan klasifikasi MH (lanau anorganik) dan SM (pasir berlanau), dengan plastisitas tinggi dan tingkat pengembangan sedang hingga tinggi. Kondisi ini menimbulkan risiko tinggi terhadap deformasi musiman dan keruntuhan lereng.



Gambar 2. Penyelidikan tanah di sekitar jembatan

Analisis Stabilitas dan Mekanisme Keruntuhan

Keruntuhan abutmen jembatan ditinjau melalui pendekatan visual, laboratorium, dan model numerik. Retakan awal yang terisi air hujan menjadi jalur infiltrasi yang meningkatkan tekanan air pori dan menurunkan kekuatan geser tanah. Kombinasi antara susut musim kemarau dan pengembangan saat hujan pada tanah ekspansif menyebabkan deformasi diferensial yang signifikan. Gerusan sungai pada sisi abutmen juga berperan besar dalam menghilangkan penopang lateral, terutama karena aliran sungai membelok langsung ke arah abutmen.

Berdasarkan data sondir, daya dukung tanah pada kedalaman dangkal tidak cukup menopang beban struktural dan timbunan tambahan. Ini dikonfirmasi dengan nilai kapasitas dukung ijin tanah (q_n) yang rendah pada kedalaman (D_f) < 3 m (Tabel 1), sehingga fondasi tambahan tidak boleh diletakkan pada kedalaman tersebut.

Tabel 1. Kapasitas dukung dari uji sondir

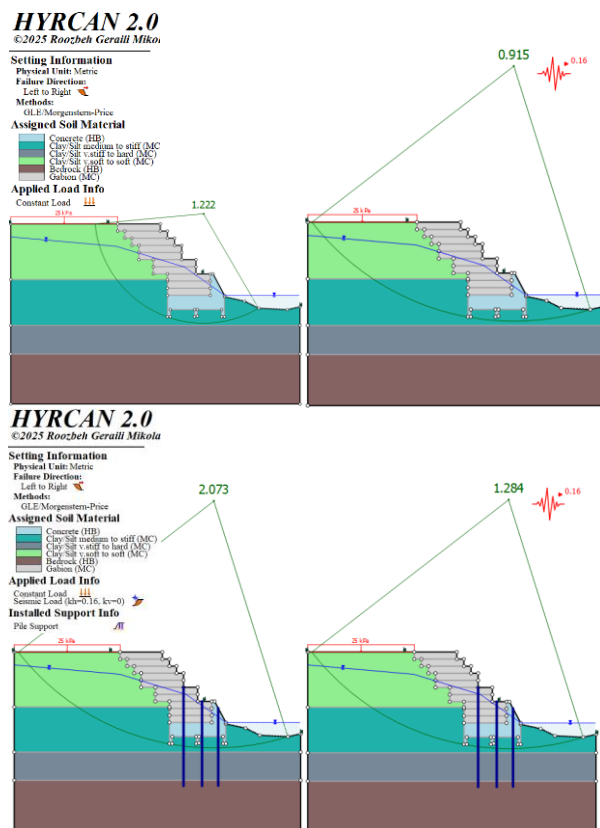
Sondir	$q_n(\text{kN/m}^2)$					
	$D_f=$ 2,5m	$D_f=$ 3,0m	$D_f=$ 3,5m	$D_f=$ 4,0m	$D_f=$ 4,5m	$D_f=$ 5,0m
S-1	71,19	75,94	66,45	56,96	90,18	189,85
S-2	11,86	71,19	272,92	474,64		

Evaluasi Perkuatan dan Faktor Keamanan

Strategi perbaikan difokuskan pada penguatan lateral dan vertikal melalui kombinasi dinding penahan tanah (DPT), bronjong, dan mini pile. Dua skenario dianalisis menggunakan metode keseimbangan batas dalam perangkat

lunak HYRCAN 22. Skenario 1 adalah berupa bronjong dan DPT hingga tanah lempung sedang. Skenario 2 adalah bronjong, DPT, dan mini pile menembus hingga lapisan tanah keras.

Hasil analisis menunjukkan bahwa skenario pertama menghasilkan faktor keamanan (SF) sebesar 1,222 (statis) dan 0,915 (dinamis), yang tidak memenuhi kriteria stabilitas lereng menurut SNI dan Bowles (1989). Sebaliknya, skenario kedua menghasilkan SF sebesar 2,073 (statis) dan 1,284 (dinamis), yang berada dalam rentang aman untuk semua standar desain. Hal ini menunjukkan bahwa elemen mini pile sangat krusial dalam meningkatkan stabilitas lereng dengan memperkuat fondasi hingga ke lapisan tanah keras.



Gambar 3. Hasil simulasi stabilitas dengan HYRCAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan integratif dengan uji getar sistem, investigasi geoteknik, dan simulasi numerik mampu memberikan dasar yang kuat untuk desain perbaikan jembatan. Perkuatan dengan kombinasi DPT, bronjong, dan mini pile terbukti meningkatkan stabilitas secara signifikan

dan memungkinkan jembatan tetap beroperasi dalam kondisi aman.

Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan. Pengujian dilakukan pada kondisi statik dan semi-dinamis, sehingga respon terhadap gempa atau aliran ekstrem belum diuji secara komprehensif. Selain itu, perubahan jangka panjang seperti pengendapan, perubahan pola aliran sungai, dan degradasi material struktur perlu dimonitor secara berkala. Oleh karena itu, disarankan penerapan sistem pemantauan jembatan jangka panjang berbasis sensor dinamis untuk deteksi dini kerusakan struktural.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil investigasi dan analisis, keruntuhan abutmen Jembatan Way Pagar Alam disebabkan oleh kombinasi tanah dasar lempung ekspansif, infiltrasi air hujan melalui retakan jalan, serta gerusan aliran sungai yang mengikis kaki fondasi. Sementara itu, hasil uji getar menunjukkan bahwa struktur atas jembatan masih dalam kondisi kaku dan aman digunakan, dengan nilai defleksi vertikal akibat beban 30 ton masih jauh di bawah batas ijin AASHTO. Uji sondir dan laboratorium tanah mengungkap bahwa daya dukung tanah sangat rendah hingga kedalaman 3 meter, sehingga tidak mampu menahan beban tambahan dari struktur dan lalu lintas.

Analisis stabilitas lereng menggunakan metode keseimbangan batas menunjukkan bahwa kombinasi perkuatan berupa bronjong, dinding penahan tanah (DPT), dan mini pile mampu meningkatkan faktor keamanan secara signifikan (1,99 statis dan 1,73 dinamis), melebihi standar minimum. Sebaliknya, sistem perkuatan tanpa mini pile tidak memenuhi kriteria aman. Dengan demikian, desain perbaikan yang diajukan berbasis pendekatan integratif struktur, geoteknik, dan hidrologi merupakan solusi efektif untuk memastikan kembali kestabilan dan fungsi jembatan secara berkelanjutan, terutama pada wilayah bertanah lunak dan beriklim tropis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Lampung atas pendanaannya dalam kegiatan penelitian melalui hibah Penelitian DIPA FT Tahun 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ettema, R., Ng, K., Chakradhar, R., Fuller, J., & Kempema, E. W. (2015). Failure of spill-through bridge abutments during scour: Flume and field observations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(5), 04014093.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000996](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000996)
- [2] Nasr, A., Kjellström, E., Björnsson, I., Honfi, D., Ivanov, O. L., & Johansson, J. (2019). Bridges in a changing climate: a study of the potential impacts of climate change on bridges and their possible adaptations. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4), 738–749.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1670215>
- [3] Chen, W.-F., & Duan, L. (Eds.). (2014). *Bridge Engineering Handbook: Fundamentals* (2nd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b15616>
- [4] Zhang, D., Xiong, W., Ma, X., Zhou, D., & Cai, C. S. (2024). Fragility evaluation of bridge shallow foundation piers under floods by coupling simulation in structural and hydraulic fields. *Ocean Engineering*, 311, 118952.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118952>
- [5] Joseph, A., Anil, A., Biju, S.S., Pomson, S.S. (2025). Case Study on Embankment Failure of Bridge at Mahe–Thalassery Bypass, Kerala, India. In: Rujikiatkamjorn, C., Xue, J., Indraratna, B. (eds) *Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG) 2024, Volume 4. ICTG 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 405. Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-97-8225-3_17
- [6] Abdi, Ari & Ou, Chang-Yu. (2023). Failure Investigation of Braced Excavation in Soft Clays: Case Study on the Collapse of Nicoll Highway. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1184. 012010.
- [7] Briaud, J.-L. (2023). *Geotechnical engineering: Unsaturated and saturated soils* (2nd ed.). Wiley.
- [8] Wang, H., Wang, Y., & Jin, F. (2024). Stability of Expansive Soil Slopes under Wetting–Drying Cycles Based on the Discrete Element Method. *Water*, 16(6), 861.
<https://doi.org/10.3390/w16060861>
- [9] Dai ZJ, Guo JH, Luo HM, Li J, Chen SX (2020b) Strength characteristics and slope stability analysis of expansive soil with filled fissures. *Appl Sci* 10(13):4616.
- [10] Dai ZJ, Chen SX, Li J (2020a) Physical model test of seepage and deformation characteristics of shallow expansive soil slope. *Bull Eng Geol Env* 79:4063–4078.
<https://doi.org/10.1007/s10064-020-01811-0>
- [11] Dai, Z., Huang, K., Chi, Z. et al. Model test study on the deformation and stability of rainfall-induced expansive soil slope with weak interlayer. *Bull Eng Geol Environ* 83, 76 (2024).
<https://doi.org/10.1007/s10064-024-03576-2>
- [12] Jiao, W., Zhang, M., Li, P. et al. Evolution model and failure mechanisms of rainfall-induced cracked red clay slopes: insights from Xinshao County, China. *J. Mt. Sci.* 21, 867–881 (2024).
<https://doi.org/10.1007/s11629-023-8443-5>
- [13] Belew, A.Z., Belay, S.K., Wosenie, M.D. et al. A Comparative Evaluation of Seepage and Stability of Embankment Dams Using GeoStudio and Plaxis Models: the Case of Gomit Dam in Amhara Region, Ethiopia. *Water Conserv Sci*

- Eng 7, 429–441 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s41101-022-00152-1>
- [14] Cheng, H., Wu, Z., Chen, H. et al. Stability analysis of unsaturated-saturated soil slopes under rainfall infiltration using the rigorous limit equilibrium method. *Bull Eng Geol Environ* 83, 147 (2024).
<https://doi.org/10.1007/s10064-024-03623-y>
- [15] Mikola, R.G., HYRCAN: A Comprehensive Limit Equilibrium Software Package for 2D Slope Stability Analysis, University of California Berkeley Institute of Governmental Studies, February 2023.
- [16] Qin, D., Xia, H. & Wu, C. Analysis of Retaining Wall Combined with Micropiles to Reinforce Slope near Overhead Bridge. *Indian Geotech J* 54, 683–689 (2024).
<https://doi.org/10.1007/s40098-023-00768-7>
- [17] Turner, J. P., & Halvorson, M. (2013). Design method for slide-stabilizing micropile walls. In *Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III* (pp. 1971–1980). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- [18] Alsubih, ., Ahmed, M., Alqadhi, S. et al. Gabion water barrier structures as a sustainable approach to water and land conservation. *Environ Sci Pollut Res* 30, 126057–126071 (2023).
- [19] Oh, S.-H., Kim, H.-J., Park, K.-S., & Kim, J.-D. (2024). Evaluation of Static Displacement Based on Ambient Vibration for Bridge Safety Management. *Sensors*, 24(20), 6557.
<https://doi.org/10.3390/s24206557>
- [20] Li, J., Wen, F., Chen, J., Yang, C., Du, W., Xu, L., & Li, P. (2023). Experimental Study of Bridge Expansion Joint Damage Based on Natural Frequency. *Sensors*, 23(14), 6437.
<https://doi.org/10.3390/s23146437>