

KARAKTERISTIK FREKUENSI ALAMI JEMBATAN BALOK BETON BERTULANG T AKIBAT VARIASI GEOMETRI: STUDI PARAMETRIK***Natural Frequency Characteristics of Reinforced Concrete T-Beam Bridges Due to Geometric Variations: A Parametric Study*****Ainil Mardhiyah^{*1}, Ernie Shinta Y. Sitanggang², Juni Indriani³, Indra Jhon Fischer⁴, Panji Marshando⁵****^{1,2,3,4,5}Politeknik Negeri Medan, Indonesia*****Email: ainilmardhiyah@polmed.ac.id****Abstract**

Natural frequency is an important dynamic parameter in evaluating bridge performance because it is influenced by structural geometry and stiffness. This study investigates the effect of geometric variations on the natural frequencies of reinforced concrete T-beam bridges using finite element-based modal analysis. A total of 27 bridge models were developed in SAP2000 with variations in span length (15, 20, and 25 m), slab thickness (180, 200, 250 mm), and bridge width (8, 10, and 12 m). the results indicate that natural frequencies increase with higher vibration modes. Increasing the span length significantly decreases the natural frequency, whereas increasing the slab thickness increases the natural frequency. In contrast, increasing the bridge width reduces the natural frequency. Among the investigated parameters, span length has the greatest influence on the natural frequency, followed by bridge width and slab thickness.

Keywords: natural frequency, modal analysis, reinforced concrete bridge, bridge geometry, SAP2000

Abstrak

Frekuensi alami merupakan salah satu parameter dinamik yang penting dalam evaluasi kinerja jembatan karena dipengaruhi oleh karakteristik geometri dan kekakuan struktur. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi geometri terhadap frekuensi alami jembatan balok beton bertulang tipe T menggunakan analisis modal berbasis metode elemen hingga. Sebanyak 27 model jembatan dikembangkan di SAP2000 dengan variasi Panjang bentang (15, 20, dan 25 m), tebal slab (180, 200, dan 250 mm), serta lebar jembatan (8, 10, dan 12 m). Hasil penelitian menunjukkan bahwa frekuensi alami meningkat seiring bertambahnya mode getar. Peningkatan Panjang bentang menurunkan frekuensi alami secara signifikan, sedangkan peningkatan tebal slab meningkatkan frekuensi alami. Sebaliknya, peningkatan lebar jembatan menyebabkan frekuensi alami menurun. Di antara ketiga parameter, panjang bentang memberikan pengaruh paling dominan terhadap karakteristik frekuensi alami, diikuti lebar jembatan dan tebal slab.

Kata Kunci: frekuensi alami, analisis modal, jembatan beton bertulang, geometri jembatan, SAP2000

PENDAHULUAN

Jembatan merupakan infrastruktur transportasi yang berperan penting dalam mendukung mobilitas, distribusi barang, dan pertumbuhan ekonomi. Seiring meningkatnya beban lalu lintas, kecepatan kendaraan, dan tuntutan umur layanan, evaluasi kinerja jembatan tidak lagi hanya berfokus pada aspek statik, tetapi juga harus mempertimbangkan respons dinamik yang dipengaruhi oleh sifat struktur,

kondisi pembebanan, dan karakteristik lingkungan (Zhao et al., 2022). Salah satu parameter fundamental dalam analisis dinamik adalah frekuensi alami karena berkaitan langsung dengan massa dan kekakuan struktur serta menentukan potensi terjadinya resonansi apabila frekuensi eksitasi mendekati frekuensi alami jembatan. Oleh karena itu, frekuensi alami menjadi parameter utama dalam analisis modal, validasi model numerik, *structural health monitoring*, serta evaluasi respons terhadap beban gempa, angin, dan kendaraan bergerak (Chen et al., 2021; García-Macías & Ubertini, 2021; Hasani & Freddi, 2023; Karakostas et al., 2024). Selain mendukung proses desain, perubahan frekuensi alami juga banyak dimanfaatkan sebagai indikator awal penurunan kekakuan akibat kerusakan atau degradasi struktur sehingga berperan penting dalam pengelolaan infrastruktur jembatan secara berkelanjutan (Deng et al., 2023; Hasani & Freddi, 2023; Kohm et al., 2023). Karakteristik frekuensi alami sangat dipengaruhi oleh konfigurasi geometri karena perubahan dimensi struktur akan mengubah distribusi massa dan kekakuan. Parameter seperti panjang bentang, lebar dek, tinggi girder, jumlah girder, dan konfigurasi penampang diketahui memengaruhi karakteristik dinamik, dengan panjang bentang dilaporkan sebagai faktor yang paling dominan karena peningkatan bentang umumnya menurunkan kekakuan lentur sehingga frekuensi alami menjadi lebih rendah (Karimi et al., 2022). Selain itu, interaksi antarparameter geometri menghasilkan respons dinamik yang kompleks sehingga pendekatan parametrik dinilai lebih mampu menggambarkan kontribusi masing-masing konfigurasi geometri dibandingkan analisis yang hanya memvariasikan satu parameter secara terpisah (Perônica et al., 2026; Verma et al., 2026).

Berbagai penelitian telah menerapkan pendekatan analitis, numerik dan *finite element analysis* (FEA) untuk mengevaluasi pengaruh variasi geometri terhadap frekuensi alami. Karimi et al. (2022) mengembangkan model prediksi frekuensi alami berdasarkan karakteristik geometri, sedangkan penelitian lain menunjukkan bahwa kombinasi panjang bentang, tinggi girder, jumlah girder, dan rasio bentang terhadap tinggi girder berpengaruh signifikan terhadap karakteristik dinamik jembatan komposit (Saglik et al., 2022). Analisis parametrik juga telah diterapkan pada jembatan box girder lengkung maupun *skew-curved bridges* dan menunjukkan bahwa konfigurasi geometri memengaruhi periode getar, frekuensi alami, dan *mode shape* (Agarwal et al., 2023; Gupta & Sandhu, 2022). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada tipe jembatan tertentu atau hanya mengevaluasi satu hingga dua parameter geometri, sehingga kajian mengenai karakteristik frekuensi alami jembatan balok beton bertulang T dengan kombinasi beberapa variasi geometri masih relatif terbatas (Hao et al., 2025; Saglik et al., 2022).

Berdasarkan *research gap* tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik frekuensi alami jembatan balok beton bertulang T akibat variasi panjang bentang, tebal slab, dan lebar jembatan melalui pendekatan parametrik berbasis pemodelan numerik. Hasil penelitian diharapkan memberikan pemahaman mengenai perubahan karakteristik frekuensi alami pada berbagai konfigurasi geometri serta menjadi referensi dalam perencanaan awal, validasi model numerik, *structural health monitoring*, dan pengembangan model prediksi karakteristik dinamik jembatan pada penelitian selanjutnya (Perônica et al., 2026; Saglik et al., 2022).

METODE

Penelitian ini menggunakan model jembatan balok beton bertulang tipe *T-beam* yang dikembangkan melalui pendekatan *Finite Element Method* (FEM). Tipe jembatan ini dipilih karena umum digunakan pada jembatan bentang pendek hingga menengah dan memiliki karakteristik dinamik yang dipengaruhi oleh konfigurasi geometri serta kekakuan struktur. Seluruh model diasumsikan berperilaku elastis linier dengan material beton bertulang yang homogen dan isotropik sehingga karakteristik dinamik dapat dievaluasi melalui analisis modal. Pendekatan FEM banyak digunakan untuk analisis dinamik jembatan karena mampu merepresentasikan distribusi massa, kekakuan, dan kondisi batas secara akurat (Kumar & Nallasivam, 2024; Luo et al., 2023). Dimensi penampang disesuaikan dengan variasi geometri yang diterapkan sehingga perubahan karakteristik dinamik merepresentasikan pengaruh konfigurasi geometri.

Penelitian menerapkan studi parametrik dengan memvariasikan tiga parameter utama, yaitu panjang bentang, tebal slab, dan lebar jembatan, yang masing-masing terdiri atas tiga tingkat variasi sehingga menghasilkan 27 model jembatan. Jumlah girder dipertahankan tetap sebanyak lima buah, sedangkan jarak antar girder dan dimensi penampang disesuaikan mengikuti perubahan geometri agar konfigurasi tetap realistis. Variasi parameter utama disajikan pada Tabel 1, sedangkan dimensi penampang girder ditampilkan pada Tabel 2. Pendekatan parametrik ini memungkinkan evaluasi pengaruh kombinasi beberapa parameter geometri terhadap karakteristik frekuensi alami secara sistematis (Kumar & Nallasivam, 2024; Perônica et al., 2026).

Tabel 1. Variasi Parameter Geometri pada Model Jembatan Balok Beton Bertulang Tipe T

Model	Bentang (m)	Tebal Slab (mm)	Lebar Jembatan (m)
1	15	180	8
2	15	180	10
3	15	180	12
4	15	200	8
5	15	200	10
6	15	200	12
7	15	250	8
8	15	250	10
9	15	250	12
10	20	180	8
11	20	180	10
12	20	180	12
13	20	200	8
14	20	200	10
15	20	200	12
16	20	250	8
17	20	250	10
18	20	250	12
19	25	180	8
20	25	180	10
21	25	180	12
22	25	200	8
23	25	200	10
24	25	200	12

25	25	250	8
26	25	250	10
27	25	250	12

Seluruh model dikembangkan menggunakan perangkat lunak SAP2000 melalui pemodelan tiga dimensi berbasis FEM. Girder dimodelkan menggunakan *frame element*, sedangkan pelat lantai menggunakan *shell element*. Kondisi batas diasumsikan sebagai *simply supported bridge*, sementara berat sendiri struktur dihitung secara otomatis berdasarkan sifat material yang didefinisikan pada perangkat lunak. Penedekatan ini telah banyak diterapkan untuk memperoleh estimasi frekuensi alami dan bentuk ragam getar yang konsisten dengan hasil analisis maupun pengujian eksperimental (Firdaus et al., 2023; Kumar & Nallasivam, 2024).

Karakteristik dinamik setiap model dievaluasi melalui analisis modal berbasis metode *eigenvalue* untuk memperoleh frekuensi alami dan bentuk ragam getar. Analisis dilakukan pada kondisi elastis linier tanpa mempertimbangkan beban dinamis eksternal sehingga karakteristik getaran bebas struktur dapat diidentifikasi. Frekuensi alami digunakan sebagai parameter utama karena merepresentasikan hubungan antara massa dan kekakuan struktur serta menjadi dasar dalam analisis respons gempa, evaluasi resonansi, dan validasi model numerik (Hao et al., 2025; Kumar & Nallasivam, 2024; Mardhiyah et al., 2023).

Tabel 2. Dimensi Penampang Girder pada Setiap Konfigurasi Model Jembatan

Model	Spasi Girder (m)	Tinggi Balok (m)	Lebar Badan (m)	Lebar Sayap (m)	Tebal Sayap (m)	Tinggi Badan (m)
1	1,8	0,94	0,25	1,8	0,18	0,76
2	2,3	0,94	0,25	2,3	0,18	0,76
3	2,8	0,94	0,25	2,8	0,18	0,76
4	1,8	0,94	0,25	2,2	0,20	0,74
5	2,3	0,94	0,25	2,6	0,20	0,74
6	2,8	0,94	0,25	3	0,20	0,74
7	1,8	0,94	0,25	2,2	0,25	0,69
8	2,3	0,94	0,25	2,6	0,25	0,69
9	2,8	0,94	0,25	3	0,25	0,69
10	1,8	1,25	0,25	2,2	0,18	1,07
11	2,3	1,25	0,25	2,6	0,18	1,07
12	2,8	1,25	0,25	3	0,18	1,07
13	1,8	1,25	0,25	2,2	0,20	1,05
14	2,3	1,25	0,25	2,6	0,20	1,05
15	2,8	1,25	0,25	3	0,20	1,05
16	1,8	1,25	0,25	2,2	0,25	1
17	2,3	1,25	0,25	2,6	0,25	1
18	2,8	1,25	0,25	3	0,25	1
19	1,8	1,56	0,25	2,2	0,18	1,38
20	2,3	1,56	0,25	2,6	0,18	1,38
21	2,8	1,56	0,25	3	0,18	1,38
22	1,8	1,56	0,25	2,2	0,20	1,36
23	2,3	1,56	0,25	2,6	0,20	1,36
24	2,8	1,56	0,25	3	0,20	1,36
25	1,8	1,56	0,25	2,2	0,25	1,31
26	2,3	1,56	0,25	2,6	0,25	1,31
27	2,8	1,56	0,25	3	0,25	1,31

Data frekuensi alami selanjutnya dianalisis menggunakan statistik deskriptif melalui penyajian nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan rentang frekuensi, serta divisualisasikan dalam bentuk tabel dan grafik. Analisis komparatif dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi panjang bentang, tebal slab, dan lebar jembatan terhadap karakteristik frekuensi alami. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada karakterisasi perubahan frekuensi alami akibat variasi konfigurasi geometri, bukan pada pengembangan model prediksi statistik (Perônica et al., 2026; Rodriguez et al., 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Frekuensi Alami Seluruh Model

Hasil analisis modal terhadap 27 model jembatan balok beton bertulang T menghasilkan frekuensi alami untuk dua belas mode getar pertama yang disajikan pada Tabel 3. Seluruh model menunjukkan adanya peningkatan nilai frekuensi alami seiring bertambahnya urutan mode getar, yang merupakan karakteristik umum dari sistem struktur elastis. Nilai frekuensi alami pada setiap model bervariasi untuk setiap mode, menunjukkan bahwa konfigurasi geometri yang berbeda menghasilkan karakteristik dinamik yang berbeda pula. Untuk memberikan gambaran umum mengenai distribusi data, statistik frekuensi alami berupa nilai minimum, maksimum, dan rata-rata pada setiap mode disajikan pada Tabel 4, sedangkan kecenderungan perubahan nilai rata-rata frekuensi alami ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 3. Frekuensi Alami Hasil Analisis Modal untuk Seluruh Model Jembatan (Mode 1-12)

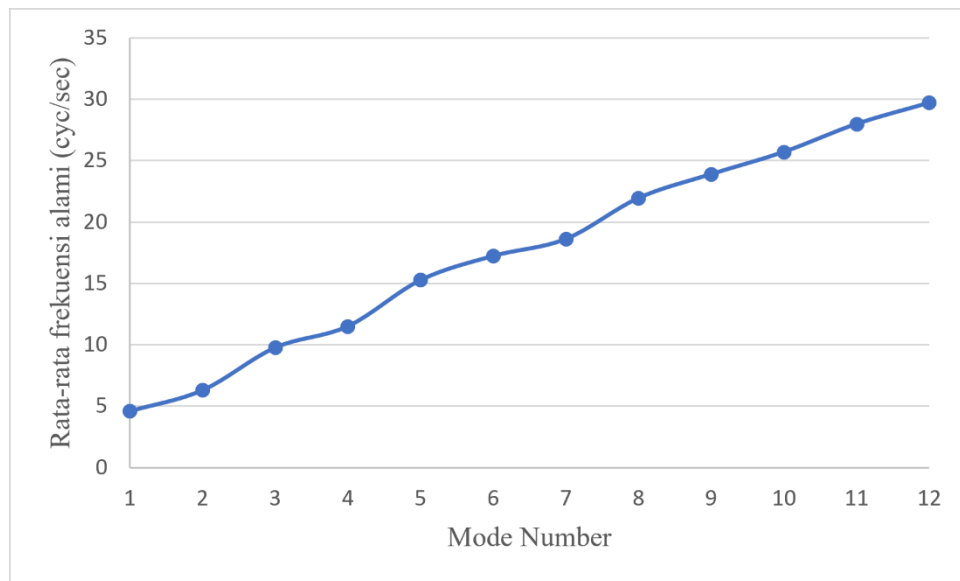
Model	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 11	M 12
1	6.014	8.482	13.917	15.344	21.589	22.386	24.589	31.388	31.568	35.354	37.302	37.823
2	5.770	7.761	11.829	13.743	17.337	20.507	22.478	26.482	28.571	30.467	33.552	35.316
3	5.536	7.137	10.483	12.442	14.310	19.424	20.808	20.941	26.263	28.477	30.970	31.566
4	5.868	8.546	14.450	16.349	21.077	24.599	24.868	31.565	32.250	36.610	39.311	40.059
5	5.607	7.803	12.080	14.625	18.655	19.965	22.573	28.539	29.504	30.713	34.240	34.693
6	5.145	7.345	11.243	14.772	17.558	18.194	21.134	26.729	28.066	29.532	31.802	32.889
7	5.527	8.706	16.196	18.880	19.916	25.189	30.908	32.353	34.827	35.118	44.081	51.880
8	5.244	7.907	13.001	16.891	18.773	22.440	22.846	28.742	31.895	33.132	36.661	37.715
9	4.994	7.215	11.104	15.229	17.582	17.766	20.859	26.215	28.317	29.476	31.322	32.588
10	4.757	6.406	9.825	11.144	17.141	17.577	18.330	21.411	24.578	26.091	27.910	29.397
11	4.621	6.041	8.825	9.714	14.104	16.505	16.929	20.997	21.733	22.987	25.616	28.070
12	4.479	5.660	8.041	8.741	11.849	15.834	16.047	17.173	21.466	21.564	23.938	24.088
13	4.673	6.480	10.422	11.658	16.834	18.825	19.587	21.644	24.899	28.988	29.435	29.791
14	4.521	6.096	9.358	9.961	15.356	16.150	17.190	21.794	23.049	23.705	26.500	27.836

15	4.36 7	5.69 4	8.517	8.854	12.64 1	15.46 7	16.11 8	19.07 0	21.47 4	21.55 8	24.47 7	26.31 1
16	4.46 3	6.64 9	11.89 2	13.28 6	16.08 3	19.67 6	22.83 6	25.18 9	25.77 7	28.05 1	33.91 4	39.77 9
17	4.27 9	6.21 1	10.69 3	10.81 3	15.31 2	17.77 6	18.98 1	22.18 9	23.33 0	26.77 9	29.06 2	31.02 6
18	4.10 5	5.77 1	9.304	9.711	14.59 6	14.98 7	16.38 6	21.48 2	21.64 8	24.28 3	25.55 5	25.91 0
19	3.91 6	4.92 9	7.094	9.030	13.67 2	13.78 1	14.16 7	16.14 6	19.04 0	19.41 3	20.56 2	23.35 0
20	3.84 1	4.81 2	6.320	8.101	11.50 0	12.94 1	13.78 0	16.30 1	16.60 5	18.65 1	19.43 9	20.60 4
21	3.75 3	4.61 0	5.747	7.437	9.901	12.50 1	13.34 1	13.93 3	16.82 5	17.95 6	18.07 0	18.67 9
22	3.86 7	5.01 2	7.491	9.525	13.97 7	14.20 9	15.47 2	16.24 5	19.68 1	21.93 7	21.99 0	23.93 9
23	3.77 8	4.87 8	6.680	8.355	12.64 6	13.24 9	13.54 4	16.65 3	18.47 8	18.96 2	20.46 0	22.89 5
24	3.67 8	4.65 7	6.072	7.561	10.67 1	12.63 6	13.08 6	15.63 8	16.82 1	18.06 7	19.36 4	20.66 9
25	3.73 6	5.19 7	8.464	11.05 6	13.48 5	15.64 4	16.44 8	20.16 6	20.80 2	23.29 5	25.79 4	29.05 7
26	3.61 6	5.01 6	7.572	9.191	12.95 9	14.04 5	15.94 8	16.74 2	19.42 7	22.47 9	23.06 9	24.41 7
27	3.49 5	4.75 7	6.879	8.012	12.44 7	12.80 7	13.17 1	16.77 6	18.21 5	20.29 6	21.10 3	21.63 1

Berdasarkan Tabel 4, frekuensi alami pada Mode 1 berada pada kisaran 3,495-6,014 *cyc/sec* dengan nilai rata-rata 4,580 *cyc/sec*. Seiring meningkatnya nomor mode, frekuensi alami juga mengalami peningkatan secara bertahap hingga mencapai kisaran 18,679-51,880 *cyc/sec* pada Mode 12 dengan nilai rata-rata sebesar 29,703 *cyc/sec*. Peningkatan nilai rata-rata pada setiap mode menunjukkan bahwa struktur memiliki respons dinamik yang semakin tinggi pada mode-mode getar yang lebih tinggi. Selain itu, nilai minimum dan maksimum pada setiap mode juga memperlihatkan kecenderungan meningkat secara konsisten, sehingga dapat disimpulkan bahwa karakteristik frekuensi alami seluruh model mengikuti pola peningkatan yang sistematis dari mode fundamental hingga mode kedua belas.

Tabel 4. Statistik Deskriptif Frekuensi Alami Seluruh Model Jembatan

Mode	Minimum (<i>cyc/sec</i>)	Maksimum (<i>cyc/sec</i>)	Rata-Rata (<i>cyc/sec</i>)
1	3.495	6.014	4.580
2	4.610	8.706	6.288
3	5.747	16.196	9.759
4	7.437	18.880	11.497
5	9.901	21.589	15.258
6	12.501	25.189	17.225
7	13.086	30.908	18.608
8	13.933	32.353	21.945
9	16.605	34.827	23.893
10	17.956	36.610	25.702
11	18.070	44.081	27.981
12	18.679	51.880	29.703



Gambar 1. Rata-Rata Frekuensi Alami pada Setiap Mode Getar Seluruh Model Jembatan

Tren peningkatan tersebut terlihat lebih jelas pada Gambar 1, yang memperlihatkan hubungan antara nomor mode getar dengan rata-rata frekuensi alami seluruh model. Grafik menunjukkan bahwa rata-rata frekuensi alami meningkat hampir secara monoton dari 4,580 *cyc/sec* pada Mode 1 menjadi 29,703 *cyc/sec* pada Mode 12. Meskipun peningkatan terjadi pada setiap mode, besarnya kenaikan tidak selalu seragam. Sebagai contoh, kenaikan rata-rata frekuensi alami dari Mode 2 ke Mode 3 mencapai sekitar 3,471 *cyc/sec*, sedangkan dari Mode 6 ke Mode 7 hanya sekitar 1,383 *cyc/sec*, yang menunjukkan bahwa perubahan karakteristik dinamik antar mode tidak bersifat linier. Pola tersebut mengindikasikan bahwa setiap mode getar memiliki karakteristik kekakuan dan distribusi massa yang berbeda sehingga menghasilkan laju peningkatan frekuensi alami yang bervariasi.

Selain mengalami peningkatan nilai rata-rata, rentang frekuensi alami pada setiap mode juga menunjukkan kecenderungan semakin lebar pada mode-mode yang lebih tinggi. Pada Mode 1, selisih antara nilai maksimum dan minimum hanya sekitar 2,520 *cyc/sec*, sedangkan pada Mode 12 meningkat menjadi sekitar 33,201 *cyc/sec*. Hal ini menunjukkan bahwa variasi frekuensi alami antar model menjadi semakin besar pada mode getar yang lebih tinggi. Dengan kata lain, karakteristik dinamik struktur pada mode tinggi lebih sensitif terhadap perubahan konfigurasi geometri dibandingkan mode fundamental. Temuan tersebut menunjukkan bahwa evaluasi karakteristik frekuensi alami tidak cukup dilakukan hanya pada mode pertama, tetapi perlu mempertimbangkan beberapa mode getar agar perilaku dinamik struktur dapat direpresentasikan secara lebih komprehensif.

Pengaruh Variasi Bentang terhadap Frekuensi Alami

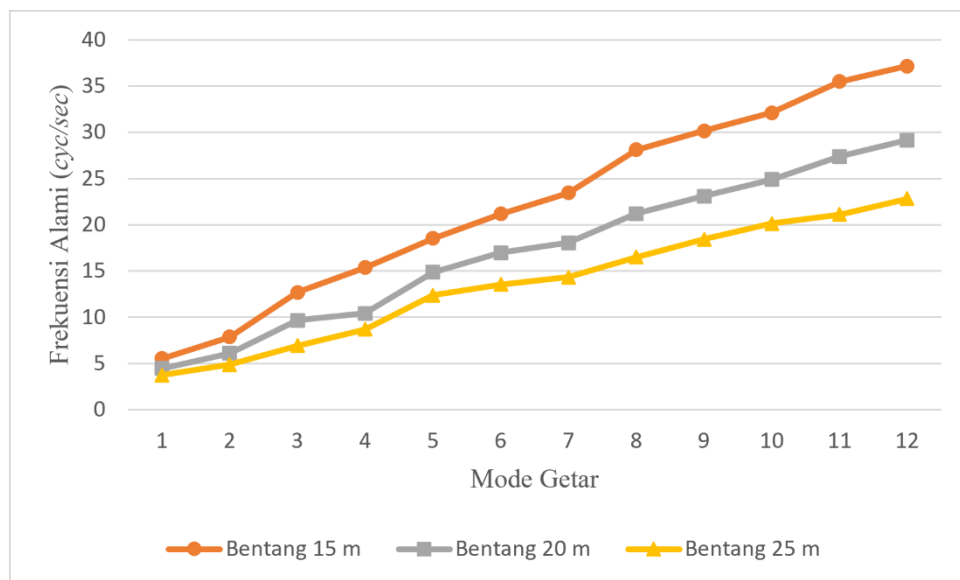
Tabel 5 dan Gambar 2 menunjukkan pengaruh variasi panjang bentang terhadap rata-rata frekuensi alami jembatan balok beton bertulang tipe T pada dua belas mode getar. Nilai frekuensi alami diperoleh dari rata-rata sembilan model untuk setiap kelompok bentang, sehingga pengaruh variasi tebal slab dan lebar jembatan dapat diminimalkan. Secara umum, seluruh model memperlihatkan kecenderungan bahwa frekuensi alami meningkat seiring bertambahnya mode

getar. Namun demikian, pada setiap mode yang sama, peningkatan panjang bentang menyebabkan penurunan frekuensi alami secara konsisten.

Tabel 5. Rata-Rata Frekuensi Alami Berdasarkan Variasi Panjang Bentang

Mode	Minimum (cyc/sec)	Maksimum (cyc/sec)	Rata-Rata (cyc/sec)
1	5.523	4.474	3.742
2	7.878	6.112	4.874
3	12.700	9.653	6.924
4	15.364	10.431	8.696
5	18.533	14.880	12.362
6	21.163	16.977	13.535
7	23.451	18.045	14.329
8	28.106	21.216	16.511
9	30.140	23.106	18.433
10	32.098	24.890	20.117
11	35.471	27.378	21.094
12	37.170	29.134	22.805

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, jembatan dengan bentang 15 m menghasilkan frekuensi alami tertinggi pada seluruh mode getar, sedangkan bentang 25 m menghasilkan frekuensi alami terendah. Pada Mode 1, rata-rata frekuensi alami masing-masing sebesar 5,52 cyc/sec, 4,47 cyc/sec, dan 3,74 cyc/sec untuk bentang 15 m, 20 m, dan 25 m. Tren yang sama tetap terlihat hingga Mode 12, dengan frekuensi alami meningkat menjadi 37,17 cyc/sec pada bentang 15 m, 29,13 cyc/sec pada bentang 20 m, dan 22,80 cyc/sec pada bentang 25 m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengaruh panjang bentang bersifat konsisten pada seluruh mode getar yang dianalisis.



Gambar 2. Pengaruh Variasi Panjang Bentang Terhadap Rata-Rata Frekuensi Alami

Penurunan frekuensi alami akibat bertambahnya panjang bentang berkaitan erat dengan berkurangnya kekakuan lentur struktur. Meskipun dimensi penampang girder telah disesuaikan pada setiap konfigurasi agar tetap memenuhi proporsi desain yang realistis, peningkatan bentang menghasilkan penambahan fleksibilitas struktur yang lebih dominan dibandingkan peningkatan kekakuannya. Berdasarkan

hubungan dasar dinamika struktur, frekuensi alami dipengaruhi oleh rasio antara kekakuan dan massa struktur. Oleh karena itu, penurunan kekakuan efektif akibat bertambahnya bentang menyebabkan frekuensi alami menjadi lebih rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa jembatan dengan bentang yang lebih panjang memiliki kecenderungan lebih mudah mengalami respons dinamik dibandingkan jembatan dengan bentang yang lebih pendek.

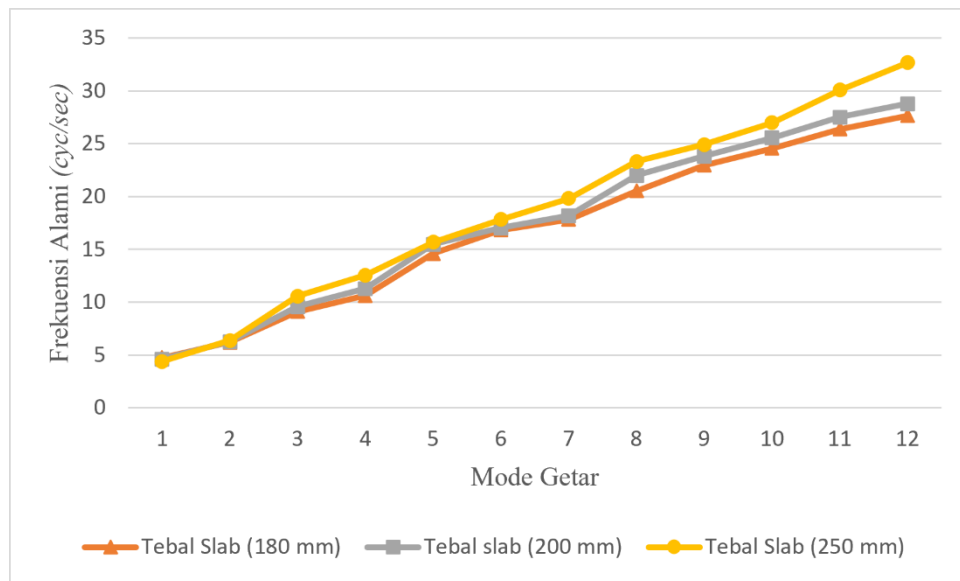
Perbedaan frekuensi alami antar bentang juga cenderung semakin besar pada mode getar yang lebih tinggi. Sebagai contoh, selisih frekuensi antara bentang 15 m dan 25 m meningkat dari sekitar 1,78 *cyc/sec* pada Mode 1 menjadi sekitar 14,37 *cyc/sec* pada Mode 12. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pengaruh panjang bentang tidak hanya memengaruhi mode fundamental, tetapi juga semakin nyata pada mode-mode yang lebih tinggi. Dengan demikian, panjang bentang merupakan salah satu parameter geometri yang memberikan pengaruh dominan terhadap karakteristik dinamik jembatan balok beton bertulang tipe T, sehingga perlu menjadi pertimbangan penting dalam evaluasi perilaku dinamik maupun perencanaan struktur jembatan.

Pengaruh Variasi Tebal Slab terhadap Frekuensi Alami

Tabel 6 dan Gambar 3 menunjukkan pengaruh variasi tebal slab terhadap rata-rata frekuensi alami jembatan balok beton bertulang tipe T pada dua belas mode getar. Nilai frekuensi alami diperoleh dari rata-rata sembilan model untuk setiap variasi tebal slab sehingga pengaruh panjang bentang dan lebar jembatan dapat diminimalkan. Secara umum, seluruh variasi tebal slab memperlihatkan kecenderungan bahwa frekuensi alami meningkat seiring bertambahnya mode getar. Selain itu, peningkatan tebal slab menghasilkan kenaikan frekuensi alami pada hampir seluruh mode yang dianalisis.

Tabel 6. Rata-Rata Frekuensi Alami Berdasarkan Variasi Tebal Slab

Mode	Minimum (<i>cyc/sec</i>)	Maksimum (<i>cyc/sec</i>)	Rata-Rata (<i>cyc/sec</i>)
1	4.743	4.611	4.384
2	6.204	6.279	6.381
3	9.120	9.590	10.567
4	10.633	11.296	12.563
5	14.600	15.491	15.684
6	16.828	17.033	17.814
7	17.830	18.175	19.820
8	20.530	21.986	23.317
9	22.961	23.802	24.915
10	24.551	25.563	26.990
11	26.373	27.509	30.062
12	27.655	28.787	32.667



Gambar 3. Pengaruh Variasi Tebal Slab Terhadap Rata-Rata Frekuensi Alami

Berdasarkan Gambar 3, model dengan tebal slab 250 mm memiliki frekuensi alami tertinggi, diikuti oleh tebal slab 200 mm, sedangkan tebal slab 180 mm menghasilkan frekuensi alami terendah. Pada Mode 1, perbedaan frekuensi alami antarvariasi tebal slab relatif kecil, yaitu sekitar 4,38-4,74 *cyc/sec*, sehingga pengaruh tebal slab terhadap mode fundamental belum terlihat secara signifikan. Namun, seiring meningkatnya mode getar, perbedaan tersebut menjadi semakin jelas. Pada Mode 12, rata-rata frekuensi alami meningkat dari 27,65 *cyc/sec* untuk tebal slab 180 mm menjadi 28,79 *cyc/sec* pada tebal slab 200 mm dan mencapai 32,67 *cyc/sec* pada tebal slab 250 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan tebal slab memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan frekuensi alami struktur.

Peningkatan frekuensi alami akibat bertambahnya tebal slab berkaitan dengan meningkatnya kekakuan global jembatan. Meskipun penambahan tebal slab juga menyebabkan bertambahnya massa struktur, peningkatan kekakuan yang dihasilkan lebih dominan dibandingkan pertambahan massa sehingga rasio kekakuan terhadap massa meningkat. Kondisi tersebut menyebabkan struktur menjadi lebih kaku dan memiliki frekuensi alami yang lebih tinggi. Fenomena ini menunjukkan bahwa perubahan dimensi slab tidak hanya memengaruhi kapasitas struktur dalam menahan beban vertikal, tetapi juga berkontribusi terhadap karakteristik dinamik jembatan.

Besarnya pengaruh tebal slab juga cenderung meningkat pada mode getar yang lebih tinggi. Selisih rata-rata frekuensi alami antara slab 180 mm dan 250 mm hanya sekitar 0,36 *cyc/sec* pada Mode 1, namun meningkat menjadi sekitar 5,01 *cyc/sec* pada Mode 12. Hal tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan kekakuan akibat penambahan tebal slab semakin berpengaruh terhadap respons dinamik pada mode-mode tinggi. Meskipun demikian, dibandingkan dengan pengaruh variasi bentang, perbedaan frekuensi alami akibat perubahan tebal slab relatif lebih kecil. Dengan demikian, tebal slab tetap berkontribusi dalam meningkatkan karakteristik dinamik jembatan, namun tingkat pengaruhnya tidak sebesar perubahan panjang bentang.

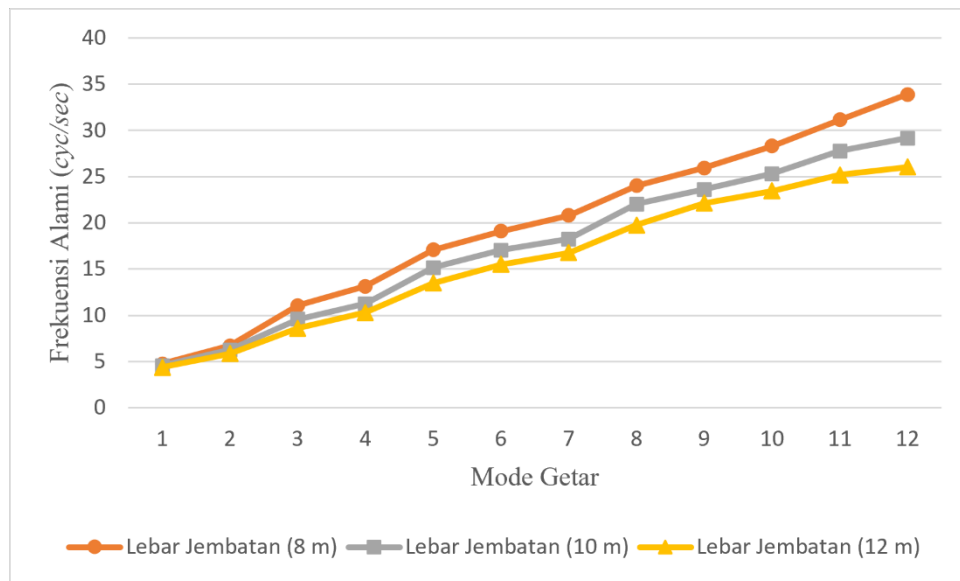
Karakteristik Frekuensi pada Variasi Konfigurasi Lebar Jembatan

Tabel 7 dan Gambar 4 menunjukkan pengaruh variasi lebar jembatan terhadap rata-rata frekuensi alami jembatan balok beton bertulang tipe T pada dua belas mode getar. Nilai frekuensi alami diperoleh dari rata-rata sembilan model untuk setiap variasi lebar jembatan sehingga pengaruh panjang bentang dan tebal slab dapat diminimalkan. Secara umum, seluruh konfigurasi lebar jembatan menunjukkan kecenderungan bahwa frekuensi alami meningkat seiring bertambahnya mode getar. Namun demikian, peningkatan lebar jembatan menyebabkan penurunan frekuensi alami pada hampir seluruh mode yang dianalisis.

Tabel 7. Rata-Rata Frekuensi Alami Berdasarkan Variasi Lebar Jembatan

Mode	Minimum (cyc/sec)	Maksimum (cyc/sec)	Rata-Rata (cyc/sec)
1	4.758	4.586	4.395
2	6.712	6.280	5.872
3	11.084	9.595	8.599
4	13.152	11.266	10.307
5	17.086	15.182	13.506
6	19.098	17.064	15.513
7	20.801	18.252	16.772
8	24.012	22.049	19.773
9	25.936	23.621	22.122
10	28.317	25.319	23.468
11	31.144	27.762	25.178
12	33.897	29.175	26.037

Berdasarkan Gambar 4, konfigurasi lebar jembatan 8 m menghasilkan frekuensi alami tertinggi, diikuti oleh lebar 10 m, sedangkan lebar 12 m menghasilkan frekuensi alami terendah. Pada Mode 1, perbedaan frekuensi alami antarvariasi lebar jembatan relatif kecil, yaitu berada pada kisaran sekitar 4-5 cyc/sec, sehingga pengaruh perubahan lebar jembatan terhadap mode fundamental belum terlihat secara signifikan. Akan tetapi, selisih frekuensi alami semakin meningkat pada mode getar yang lebih tinggi. Pada Mode 12, rata-rata frekuensi alami mencapai sekitar 34 cyc/sec pada lebar jembatan 8 m, 29 cyc/sec pada lebar 10 m, dan sekitar 26 cyc/sec pada lebar 12 m. Pola tersebut menunjukkan bahwa bertambahnya lebar jembatan secara konsisten diikuti oleh penurunan frekuensi alami struktur.



Gambar 4. Pengaruh Variasi Lebar Jembatan Terhadap Rata-Rata Frekuensi Alami

Penurunan frekuensi alami akibat bertambahnya lebar jembatan berkaitan dengan perubahan konfigurasi geometri penampang. Dalam penelitian ini, jumlah girder dipertahankan tetap sebanyak lima buah pada seluruh model, sehingga peningkatan lebar jembatan menyebabkan bertambahnya jarak antar girder serta perubahan dimensi penampang yang mengikuti konfigurasi desain. Perubahan tersebut meningkatkan massa total struktur sekaligus mengurangi efisiensi distribusi kekakuan melintang, sehingga rasio kekakuan terhadap massa menjadi lebih kecil. Akibatnya, struktur memiliki kecenderungan bergetar dengan frekuensi alami yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi jembatan yang lebih sempit.

Pengaruh variasi lebar jembatan juga terlihat semakin jelas pada mode-mode getar yang lebih tinggi. Selisih frekuensi alami antara konfigurasi lebar 8 m dan 12 m relatif kecil pada Mode 1, namun meningkat secara bertahap hingga mencapai perbedaan sekitar 8 cyc/sec pada Mode 12. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi lebar jembatan tidak hanya memengaruhi mode fundamental, tetapi juga memberikan pengaruh yang lebih nyata terhadap karakteristik dinamik pada mode getar yang lebih tinggi. Dibandingkan dengan hasil sebelumnya, pengaruh variasi lebar jembatan terhadap frekuensi alami berada di antara pengaruh panjang bentang dan tebal slab. Dengan demikian, lebar jembatan merupakan salah satu parameter geometri yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan struktur karena memengaruhi karakteristik dinamik jembatan, meskipun pengaruhnya tidak sebesar perubahan panjang bentang.

Perbandingan Karakteristik Frekuensi antar Variasi Geometri

Hasil analisis pada variasi panjang bentang, tebal slab, dan lebar jembatan menunjukkan bahwa ketiga parameter geometri memberikan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik frekuensi alami jembatan balok beton bertulang tipe T. Secara umum, seluruh konfigurasi menghasilkan kecenderungan yang sama, yaitu frekuensi alami akan meningkat seiring bertambahnya mode getar. Namun, besarnya perubahan frekuensi alami pada setiap mode sangat dipengaruhi oleh parameter geometri yang divariasikan. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa setiap parameter memberikan kontribusi yang berbeda terhadap perubahan

kekakuan dan massa struktur.

Berdasarkan hasil analisis, panjang bentang merupakan parameter yang memberikan pengaruh paling dominan terhadap frekuensi alami. Peningkatan panjang bentang dari 15 m menjadi 25 m menyebabkan penurunan frekuensi alami yang paling besar pada seluruh mode getar. Pada Mode 12, selisih rata-rata frekuensi alami antara bentang 15 m dan 25 m mencapai 14,37 *cyc/sec*, jauh lebih besar dibandingkan variasi parameter lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa bertambahnya bentang secara signifikan menurunkan kekakuan global struktur sehingga menghasilkan frekuensi alami yang lebih rendah.

Sebaliknya, variasi tebal slab memberikan pengaruh paling kecil terhadap perubahan frekuensi alami. Meskipun peningkatan tebal slab dari 180 mm menjadi 250 mm meningkatkan frekuensi alami pada seluruh mode getar, besarnya perubahan relatif terbatas. Pada Mode 12, selisih frekuensi alami antara kedua konfigurasi tersebut hanya sekitar 5,01 *cyc/sec*. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan akibat penambahan tebal slab sebagian diimbangi oleh bertambahnya massa struktur, sehingga perubahan rasio kekakuan terhadap massa tidak seesar perubahan yang terjadi akibat variasi panjang bentang.

Sementara itu, variasi lebar jembatan memberikan pengaruh yang berada di antara kedua parameter tersebut. Bertambahnya lebar jembatan dari 8 m menjadi 12 m menyebabkan frekuensi alami menurun secara konsisten pada seluruh mode getar, dengan selisih sekitar 8 *cyc/sec* pada Mode 12. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi melintang, yang meliputi bertambahnya jarak antar girder serta perubahan dimensi penampang mengikuti konfigurasi desain, memengaruhi distribusi massa dan kekakuan struktur. Meskipun demikian, besarnya pengaruhnya masih lebih kecil dibandingkan perubahan panjang bentang.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sensitivitas frekuensi alami terhadap variasi geometri dapat diurutkan berdasarkan tingkat pengaruhnya, yaitu panjang bentang > lebar jembatan > tebal slab. Urutan tersebut mengindikasikan bahwa perubahan dimensi longitudinal memberikan pengaruh terbesar terhadap karakteristik dinamik jembatan, sedangkan perubahan dimensi penampang memberikan pengaruh yang relatif lebih kecil. Temuan ini menunjukkan bahwa dalam tahap perencanaan maupun evaluasi dinamik jembatan, penentuan panjang bentang menjadi faktor utama yang perlu dipertimbangkan karena secara langsung memengaruhi kekakuan global struktur dan karakteristik frekuensi alaminya. Sementara itu, optimasi tebal slab dan lebar jembatan dapat digunakan sebagai parameter pendukung untuk meningkatkan performa dinamik tanpa memberikan perubahan yang sebesar variasi panjang bentang.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi geometri terhadap karakteristik frekuensi alami jembatan balok beton bertulang tipe T melalui analisis modal menggunakan metode elemen hingga pada 27 model jembatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh model memiliki kecenderungan yang sama, yaitu frekuensi alami meningkat seiring bertambahnya mode getar. Nilai rata-rata frekuensi alami seluruh model meningkat dari 4,58 *cyc/sec* pada Mode 1 menjadi 29,70 *cyc/sec* pada Mode 12, yang menunjukkan peningkatan karakteristik dinamik pada model getar yang lebih tinggi.

Variasi geometri memberikan pengaruh yang berbeda terhadap frekuensi alami. Peningkatan panjang bentang dari 15 m menjadi 25 m menyebabkan penurunan frekuensi alami yang paling signifikan akibat berkurangnya kekakuan global struktur. Sebaliknya, peningkatan tebal slab dari 180 mm menjadi 250 mm meningkatkan frekuensi alami karena penambahan kekakuan lebih dominan dibandingkan peningkatan massa struktur. Sementara itu, peningkatan lebar jembatan dari 8 m menjadi 12 m menurunkan frekuensi alami akibat perubahan konfigurasi melintang yang memengaruhi distribusi massa dan kekakuan struktur. Perbandingan antarparameter menunjukkan bahwa panjang bentang merupakan parameter geometri yang paling dominan memengaruhi frekuensi alami, diikuti oleh lebar jembatan, sedangkan tebal slab memberikan pengaruh paling kecil. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan dimensi longitudinal memiliki kontribusi terbesar terhadap karakteristik dinamik jembatan dibandingkan perubahan dimensi penampang maupun dimensi melintang. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam perencanaan awal maupun evaluasi dinamik jembatan beton bertulang, khususnya dalam menentukan konfigurasi geometri yang mampu menghasilkan karakteristik frekuensi alami yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, P., Pal, P., & Mehta, P. K. (2023). Finite element analysis of reinforced concrete curved box-girder bridges. *Advances in Bridge Engineering*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s43251-023-00080-7>
- Chen, G., Wu, Z., Gong, C., Zhang, J., & Sun, X. (2021). DIC-Based Operational Modal Analysis of Bridges. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1). <https://doi.org/10.1155/2021/6694790>
- Deng, Z., Huang, M., Wan, N., & Zhang, J. (2023). The Current Development of Structural Health Monitoring for Bridges: A Review. *Buildings*, 13(6), 1360. <https://doi.org/10.3390/buildings13061360>
- Firdaus, A., Alami, F., Isnaeni, M., & Helmi, M. (2023). STUDI PERBANDINGAN PEMBEBANAN DINAMIS PADA JEMBATAN BETON TERHADAP PEMODELAN FEA. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, 11(2), 331–340. <https://doi.org/10.23960/jrsdd.v11i2.3190>
- García-Macías, E., & Ubertini, F. (2021). Structural assessment of bridges through ambient noise deconvolution interferometry: application to the lateral dynamic behaviour of a RC multi-span viaduct. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(3), 123. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00273-9>
- Gupta, T., & Sandhu, D. (2022). Seismic response of horizontally curved bridges in combination with skewed abutments. *Structures*, 36, 864–878. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.068>
- Hao, M., Zhou, S., Han, Y., Zhu, Z., Yang, Q., Fan, J., & Sun, P. (2025). Performance Evaluation of Damaged T-Beam Bridges with External Prestressing Reinforcement Based on Natural Frequencies. *Structural Durability & Health Monitoring*, 19(2), 399–415. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2024.056250>

- Hasani, H., & Freddi, F. (2023). Operational Modal Analysis on Bridges: A Comprehensive Review. *Infrastructures*, 8(12), 172. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8120172>
- Karakostas, C., Quaranta, G., Chatzi, E., Zülfikar, A. C., Çetindemir, O., De Roeck, G., Döhler, M., Limongelli, M. P., Lombaert, G., Apaydin, N. M., Pakrashi, V., Papadimitriou, C., & Yeşilyurt, A. (2024). Seismic assessment of bridges through structural health monitoring: a state-of-the-art review. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(3), 1309–1357. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01819-3>
- Karimi, F., Akbari, R., & Maalek, S. (2022). A Simple Conceptual Model for Estimating the First Bending Natural Frequency of Bridge Superstructures. *Shock and Vibration*, 2022, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2022/1202384>
- Kohm, M., Stempniewski, L., & Stark, A. (2023). Influence of vehicle traffic on modal-based bridge monitoring. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 13(1), 219–234. <https://doi.org/10.1007/s13349-022-00630-z>
- Kumar, S., & Nallasivam, K. (2024). Modal analysis of natural dynamic frequency for a double deck cable-stayed steel bridge by using finite element method. *Discover Civil Engineering*, 1(1), 115. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00123-6>
- Luo, S., Zhang, Y., Shen, J., & Li, Z. (2023). Finite Element Model Updating of Steel Arch Bridge Based on First-Order Mode Test Data. *Shock and Vibration*, 2023, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2023/9326195>
- Mardhiyah, A., Tarigan, J., & Bangun, E. P. (2023). Application of Modal Analysis of Earthquake Force and Natural Frequency Tanjung Baru Bridge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1244(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1244/1/012004>
- Perônica, D. S., Pimentel, R. L., & da Silva, F. T. (2026). Parametric Design Framework of a Composite Footbridge Featuring Ultimate and Vibration Serviceability Limit States. *Journal of Bridge Engineering*, 31(8). <https://doi.org/10.1061/JBENF2.BEENG-7841>
- Rodriguez, A. F., Mackie, K. R., & Scott, M. H. (2023). Nonlinear Response Sensitivity Analysis of Typical Highway Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 28(7). <https://doi.org/10.1061/JBENF2.BEENG-6109>
- Saglik, H., Balkaya, C., Chen, A., Ma, R., & Doran, B. (2022). Development of natural frequency in multi-span composite bridges with variable cross-section: Analytical and numerical solutions. *Structures*, 45, 1657–1666. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.082>
- Verma, V., Wani, K. U. F., Nallasivam, K., Singh, A., Kumar, M., & Adinarayana, B. (2026). A comprehensive study on factors affecting free vibration of thin-walled curved box-girder bridges using regression modelling. *AI in Civil Engineering*, 5(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s43503-025-00084-4>
- Zhao, R., Zheng, K., Wei, X., Jia, H., Li, X., Zhang, Q., Xu, G., Zhan, Y., Shen, R., Zhang, F., Pu, Q., Gou, H., & Yu, C. (2022). State-of-the-art and annual progress of bridge engineering in 2021. *Advances in Bridge Engineering*, 3(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s43251-022-00070-1>