

## Analisis Sensitivitas *Frame 2d Tipe Portal* terhadap Variasi Geometri dan Kondisi Batas dengan SAP2000

Muhammad Guntur Kasriady\*, Andi Aulia Novianti, Husnul Khotimah, Muhammad Zubair Muis Alie

Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

\*[muhguntur1410@gmail.com](mailto:muhguntur1410@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini membahas sensitivitas kekakuan *frame 2D* tipe portal terhadap variasi geometri dan kondisi batas menggunakan analisis elemen hingga pada SAP2000. Kekakuan struktural menjadi aspek penting dalam menentukan respons deformasi dan distribusi gaya dalam, terutama pada sistem portal yang sangat dipengaruhi perubahan dimensi elemen dan kekangan tumpuan. Model portal dianalisis dengan beban terdistribusi vertikal dan horizontal sebesar 10 kN/m untuk mengevaluasi perilaku gaya geser, momen lentur, gaya aksial, serta perpindahan. Hasil analisis menunjukkan bahwa gaya geser maksimum mencapai 7.086 kN pada dasar kolom, sedangkan momen terbesar terjadi pada tumpuan jepit dengan nilai 20.673 kN·m. Gaya aksial pada kedua kolom didominasi tekan dan relatif konstan sepanjang ketinggian, mencerminkan pengaruh beban vertikal yang signifikan. Perpindahan lateral maksimum berada pada kisaran 0,202 m, yang masih dalam batas aman untuk analisis sensitivitas namun tetap perlu peninjauan terhadap kriteria drift pada desain aktual. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan kecil pada geometri dan kondisi batas dapat menghasilkan variasi respons struktural yang bermakna, sehingga studi sensitivitas penting dilakukan pada tahap awal perancangan untuk memperoleh konfigurasi struktur yang lebih efisien dan stabil.

**Kata Kunci:** *frame 2D, kekakuan struktur, kondisi batas, SAP2000*

### Abstract

*This study examines the stiffness sensitivity of 2D portal-type frames to variations in geometry and boundary conditions using finite element analysis in SAP2000. Structural stiffness plays a critical role in determining deformation responses and internal force distribution, particularly in portal systems that are highly influenced by changes in element dimensions and support restraints. The portal model is analyzed under vertical and horizontal distributed loads of 10 kN/m to evaluate shear forces, bending moments, axial forces, and displacements. The analysis shows that the maximum shear force reaches 7,086 kN at the base of the column, while the largest moment occurs at the fixed support with a value of 20,673 kN·m. The axial forces in both columns are dominated by compression and remain relatively constant along their height, reflecting the significant influence of vertical loading. The maximum lateral displacement is approximately 0.202 m, which remains within acceptable limits for sensitivity analysis but still requires consideration of drift criteria for real design applications. These findings indicate that small changes in geometry and boundary conditions can produce meaningful variations in structural response, highlighting the importance of sensitivity studies during early design stages to achieve a more efficient and stable structural configuration.*

**Keywords:** *2D frame, structural stiffness, boundary conditions, SAP2000*

## PENDAHULUAN

Kekakuan struktural merupakan parameter fundamental dalam analisis struktur karena berperan langsung dalam menentukan respons deformasi dan kestabilan suatu sistem ketika menerima beban [6]. Gere et al. menjelaskan bahwa kekakuan elemen struktur merupakan ukuran resistensi terhadap perubahan bentuk, dan sensitivitasnya sangat dipengaruhi modifikasi geometri maupun kondisi batas sebuah sistem [6]. Hal ini menunjukkan bahwa bahkan perubahan kecil pada panjang elemen, tinggi portal, atau kekangan tumpuan dapat menghasilkan perbedaan signifikan pada gaya dalam dan perpindahan struktur [8], [9].

Pada struktur *frame 2D* tipe portal, interaksi antara gaya aksial, geser, dan momen menjadikan perilaku kekakuan lebih kompleks dibandingkan struktur rangka batang [9]. Timoshenko et al. menekankan bahwa struktur portal sangat peka terhadap variasi panjang elemen vertikal, kekakuan lentur balok, serta kondisi rotasi pada simpul-simpulnya [10]. Temuan ini diperkuat oleh McGuire et al., yang menyatakan bahwa sistem portal merupakan salah satu bentuk struktur paling sensitif terhadap variasi boundary conditions, terutama perbedaan antara tumpuan sendi, rol, dan jepit [9].

Penelitian lain yang dilakukan oleh Chan et al. menunjukkan bahwa variasi tinggi portal dan rasio kekakuan kolom balok dapat mengubah kekakuan lateral struktur secara drastis, bahkan dalam kondisi beban statik sederhana [3]. Dengan demikian,



studi sensitivitas kekakuan pada frame 2D menjadi penting terutama dalam tahap konseptual desain, ketika konfigurasi struktural belum bersifat final dan masih dapat dioptimalkan [14].

Dalam kajian numerik modern, perangkat lunak SAP2000 menjadi salah satu alat analisis elemen hingga yang paling banyak digunakan [5]. Menurut dokumentasi resmi Computers & Structures Inc., SAP2000 menggunakan formulasi matriks kekakuan elemen frame yang mampu menggambarkan perilaku lentur, aksial, dan geser secara simultan, sehingga cocok untuk studi parametrik yang membutuhkan representasi perilaku struktur secara akurat [5]. Meskipun demikian, Cook et al. menekankan pentingnya validasi numerik menggunakan metode analitis untuk memastikan konsistensi dan menghindari kesalahan interpretasi hasil analisis [4].

Berdasarkan kebutuhan tersebut, tujuan penelitian ini adalah menilai sensitivitas frame 2D tipe portal terhadap variasi geometri dan kondisi batas dengan memanfaatkan analisis SAP2000. Pemodelan frame 2D dipilih karena dapat merepresentasikan perilaku portal secara sederhana namun tetap akurat [8], [12]. Pemahaman sensitivitas ini membantu perencana membuat keputusan yang lebih tepat sejak awal, sehingga desain menjadi lebih efisien dan aman [17].

## STRUCTURAL MODELING

Pemodelan portal 2D dalam penelitian ini dilakukan menggunakan elemen frame pada perangkat lunak SAP2000 dengan asumsi sambungan kaku pada setiap pertemuan elemen [5]. Struktur dianalisis sebagai portal satu tingkat dan satu bentang, di mana beban merata sebesar 1 ton/m diterapkan pada balok sebagai beban referensi untuk mengevaluasi respons kekakuan dan deformasi [14]. Parameter geometris utama portal ditampilkan pada Tabel 1.

Material baja ASTM A992 digunakan pada pemodelan portal 2D karena memiliki kekakuan elastis tinggi dan perilaku mekanik yang stabil di bawah beban aksial maupun lentur [6]. Dengan modulus elastisitas sebesar 200 GPa, rasio Poisson 0,30, densitas 7850 kg/m<sup>3</sup>, serta tegangan luluh minimum 345 MPa, material ini mampu memberikan resistensi deformasi sehingga sesuai untuk analisis yang menitikberatkan pada perubahan kekakuan struktur [10].

Tabel 1. Dimensi Elemen Struktur

Elemen	Length(m)
<i>Number of Stories</i>	0.1
<i>Number of Bays</i>	0.1
<i>Story Height</i>	0.3
<i>Bay Width</i>	0.6

Pada model numerik, tumpuan dasar diberikan kondisi jepit sehingga seluruh derajat kebebasan tertahan, sementara seluruh sambungan antar elemen diasumsikan sebagai rigid joint untuk memastikan transfer momen berlangsung penuh [9]. Elemen frame 2D digunakan karena mampu memodelkan gaya aksial, geser, dan momen lentur secara simultan, sehingga perubahan kekakuan akibat variasi geometri dan kondisi batas dapat diamati secara komprehensif [4], [13]. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi langsung terhadap pengaruh karakteristik struktural terhadap deformasi dan distribusi gaya dalam portal [17]. Secara teoritis, pendekatan analisis kekakuan struktur dinyatakan secara matematis dalam persamaan berikut:

### Kekakuan aksial batang (*Truss Element*):

$$k = \frac{EA}{L} \quad (1)$$

Dimana, k menyatakan kekakuan aksial batang dengan satuan N/m, E merupakan modulus elastisitas material dalam satuan Pa atau N/m<sup>2</sup>, A adalah luas penampang batang dalam satuan m<sup>2</sup>, sedangkan L menunjukkan panjang batang dalam satuan meter [6], [8].

### Kekakuan lentur (*Beam Element*):

$$k = \frac{12EI}{L^3} \quad (2)$$

Dimana, E menunjukkan modulus elastisitas material yang dinyatakan dalam satuan Pascal (Pa), I merupakan momen inersia penampang dengan satuan m<sup>4</sup>, sedangkan L menyatakan panjang elemen balok atau kolom dalam satuan meter [10].

**Matriks kekakuan batang (koordinat lokal):**

$$[k]^e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Dimana,  $[k]^e$  menyatakan matriks kekakuan elemen pada sistem koordinat lokal dengan satuan N/m, E merupakan modulus elastisitas material dalam satuan Pa atau N/m<sup>2</sup>, A adalah luas penampang elemen batang dalam satuan m<sup>2</sup>, dan L menunjukkan panjang elemen batang dalam satuan meter [7], [12].

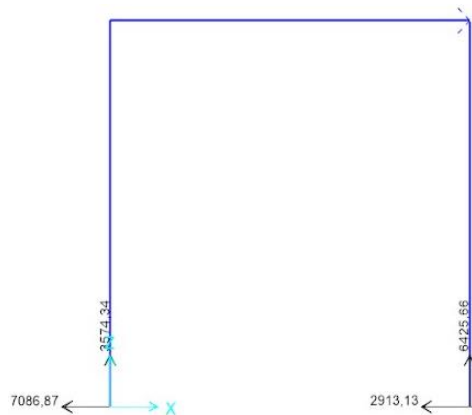
**Matriks kekakuan elemen *frame* 2D (mempertimbangkan gaya aksial dan lentur):**

$$[k]^e = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Dimana, EI menyatakan kekakuan lentur yang diperoleh dari hasil perkalian modulus elastisitas dengan momen inersia penampang, sedangkan L merupakan panjang elemen dalam satuan meter. Nilai-nilai yang terdapat di dalam matriks menggambarkan hubungan kekakuan antara simpul ujung elemen dan rotasi yang terjadi pada elemen tersebut [4], [13].

**ANALYSIS CASES**

Analisis frame 2 dimensi dilakukan dengan satu kasus pembebanan menggunakan pendekatan metode statik linier [8], di mana struktur dikenai beban terdistribusi vertikal dan horizontal sebesar 10 kN/m pada elemen-elemen utamanya. Selain beban tersebut, berat sendiri dihitung otomatis oleh SAP2000 sebagai tambahan gaya gravitasi [5]. Boundary condition terdiri dari kombinasi sendi-rol pada satu sisi serta jepit-jepit pada sisi lainnya, sehingga menghasilkan kondisi kekangan yang berbeda terhadap gerakan dan rotasi [9]. Pengaturan ini memungkinkan pemodelan perilaku struktur secara menyeluruh, sehingga respon gaya dalam dan deformasi akibat beban gabungan dapat dianalisis dengan lebih akurat [14].



Gambar 1. Pembebanan pada *Frame*

**RESULT AND DISCUSSION**

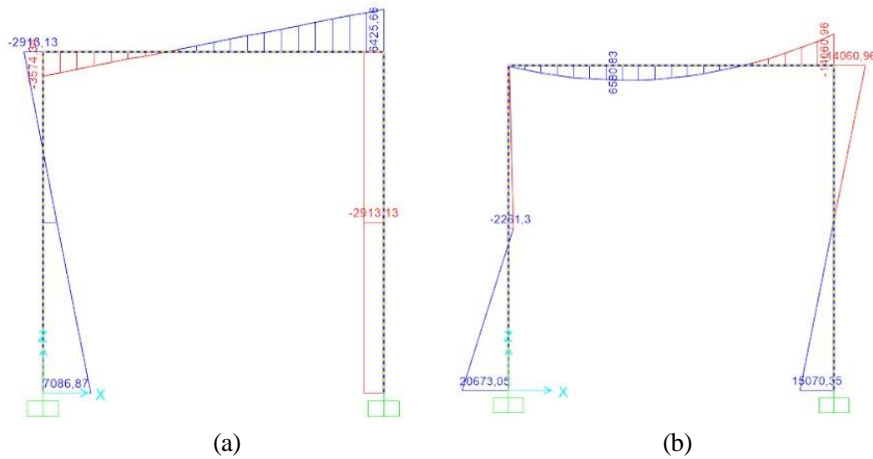
**Forces Distribution**

Pada Gambar 2. a) diperoleh nilai setelah melakukan running model yaitu gaya geser 7086,87 kN pada dasar, bertransisi menjadi -2918,13 kN pada sambungan balok-kolom dan kolom kanan menunjukkan gaya geser 2913,13 kN pada dasar dan puncak. Gaya geser balok menampilkan distribusi gaya geser segitiga, yang khas untuk beban terdistribusi merata [6]. Visualisasi berkode warna (biru dan merah) membedakan antara daerah geser positif dan negatif, dengan titik transisi terjadi di mana gaya geser melintasi nol. Nilai geser ini masih aman selama kapasitas geser memenuhi standar desain [1].

Distribusi momen mengungkapkan nilai-nilai kritis pada berbagai lokasi struktur. Momen negatif pada sambungan balok kolom kiri tercatat sebesar -2281,3 kN.m, sedangkan momen positif maksimum pada tengah bentang balok mencapai 1060,96 kN.m. Momen dasar yang terjadi pada kolom kiri adalah 20673,05 kN.m, sementara pada kolom kanan tercatat sebesar



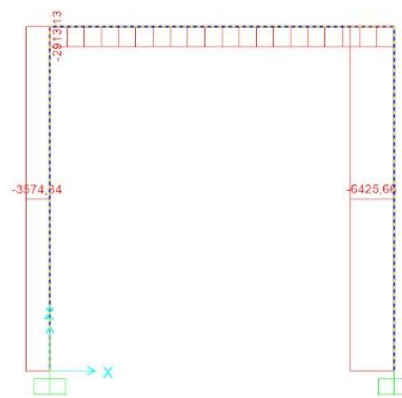
14070,35 kN.m. Diagram momen lentur yang ditunjukkan Gambar 2. b) merupakan perilaku frame kaku, dengan kontinuitas momen pada sambungan balok-kolom [9]. Momen negatif pada sambungan menunjukkan hogging (tegangan pada serat atas), sedangkan momen positif pada tengah bentang menunjukkan sagging (tegangan pada serat bawah) [10]. Momen dasar yang besar mencerminkan kondisi tumpuan jepit dan ketahanan frame terhadap perpindahan lateral [17]. Pola distribusi momen ini menunjukkan bahwa kolom kiri menerima beban yang lebih besar dibandingkan dengan kolom kanan, yang konsisten dengan perbedaan reaksi tumpuan yang telah diamati sebelumnya.



Gambar 2. Forces Distribution: (a) Sheer 2-2, (b) Moment 3-3

### Axial Force Distribution

Pada Gambar 3, gaya aksial pada kedua kolom berasal dari hasil analisis SAP2000 terhadap kombinasi beban vertikal dan horizontal yang bekerja pada portal [5]. Kolom kanan menunjukkan gaya aksial sekitar  $-5.874,94$  kN, sedangkan kolom kiri menerima sekitar  $-5.425,66$  kN; tanda negatif serta pewarnaan merah pada diagram menandakan bahwa kedua nilai tersebut berupa gaya tekan [6]. Distribusi aksial pada masing-masing kolom terlihat hampir konstan sepanjang tinggi kolom, yang sesuai dengan respons struktur terhadap beban vertikal yang dominan [14]. Perbedaan besar gaya tekan antara kolom kanan dan kiri terjadi karena pembagian beban yang tidak simetris, sebagaimana tercermin pada nilai reaksi tumpuan sebelumnya [9].

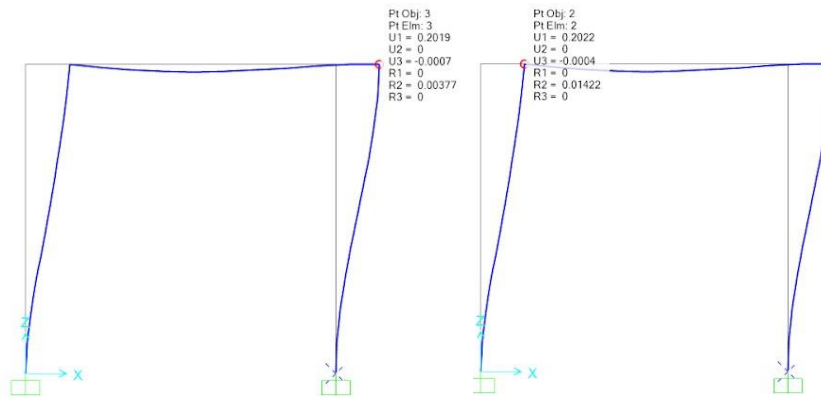


Gambar 3. Axial Force

### Deformation Analysis

Pada Gambar 4. menampilkan konfigurasi terdeformasi dari portal frame di bawah beban yang diterapkan. Analisis deformasi memberikan informasi kritis tentang perpindahan dan rotasi struktur [4].

Struktur menunjukkan pergerakan lateral (sidesway) ke kanan, dengan perpindahan lateral maksimum terjadi pada level balok (sekitar 0,20 satuan). Drift lateral ini merupakan perilaku karakteristik dari portal frame di bawah kombinasi pembebanan vertikal dan lateral atau pembebanan vertikal asimetris [17]. Perpindahan vertikal minimal (kurang dari 0,001 satuan), menunjukkan bahwa frame relatif kaku dalam arah vertikal [6]. Nilai rotasi (R2) menunjukkan tingkat rotasi sambungan, dengan Node 2 mengalami rotasi lebih besar daripada Node 3 [9].



(a) Node 3 (b) Node 2  
 Gambar 4. Deformation: (a) Node, (b) Node 2

**Displacement**

Pada tabel 2. perpindahan yang dihasilkan dari analisis SAP2000 menunjukkan bahwa pergeseran terbesar terjadi pada arah sumbu-X (U1), dengan nilai maksimum sekitar 0,2022 m, yang muncul akibat kombinasi beban lateral dan variasi geometri pada model [5]. Sementara itu, perpindahan pada sumbu-Z (U3) relatif kecil, berada pada rentang -0,0004 m hingga -0,0016 m, dan perpindahan pada sumbu-Y (U2) tidak mengalami perubahan berarti karena tidak terdapat gaya yang bekerja pada arah tersebut. Nilai rotasi (R1, R2, R3) tercatat nol, menandakan bahwa respons struktur didominasi oleh translasi tanpa deformasi rotasional signifikan, yang sesuai dengan konfigurasi pembebanan dan kondisi batas pada frame 2D [9]. Ditinjau dari aspek keamanan, besarnya perpindahan lateral maksimum masih dapat dikategorikan aman selama memenuhi batas simpangan antarlantai maupun batas drift yang direkomendasikan untuk portal 2D [1], [17]. Pada nilai 0,2022 m, struktur ini masih berada dalam batas wajar untuk studi sensitivitas, namun tetap perlu dibandingkan dengan kriteria desain untuk memastikan kelayakannya dalam kondisi nyata.

Tabel 2. Displacement

Joint	U1 (m)	U2 (m)	U3 (m)	R1 (rad)	R2 (rad)	R3 (rad)
1	0.2022	0	-0.0004	0	0	0
2	0.2019	0	-0.0007	0	0	0
3	0.2015	0	-0.001	0	0	0
4	0.2012	0	-0.0013	0	0	0
5	0.2008	0	-0.0016	0	0	0

**CONCLUSIONS**

Analisis sensitivitas kekakuan pada frame 2D tipe portal telah dilakukan menggunakan metode kekakuan melalui perangkat lunak SAP2000 [5]. Model portal dianalisis di bawah kombinasi beban vertikal dan horizontal untuk menilai perubahan respons struktural akibat variasi geometri dan kondisi batas [9]. Distribusi gaya dalam, gaya aksial, serta perpindahan dievaluasi sebagai dasar penilaian pengaruh tiap parameter terhadap perilaku keseluruhan portal [14]. Berdasarkan hasil analisis, variasi geometri dan kondisi batas terbukti memengaruhi kekakuan serta respons global portal 2D. Perubahan tinggi kolom, panjang balok, dan jenis tumpuan menyebabkan perbedaan distribusi gaya geser, momen lentur, dan gaya aksial pada elemen struktur [3], [9]. Hasil analisis SAP2000 juga menunjukkan bahwa respons struktur dipengaruhi tidak hanya oleh besar beban, tetapi juga oleh pola kekangan, yang terlihat dari momen dasar lebih besar pada kolom bertumpuan jepit serta distribusi gaya aksial yang tidak simetris [5], [17]. Selain itu, perpindahan lateral maksimum sekitar 0,202 m masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk analisis sensitivitas [1]. Namun, nilai tersebut menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi awal dapat memengaruhi stabilitas lateral portal, sehingga evaluasi sensitivitas pada tahap perancangan awal penting dilakukan agar struktur tetap efisien dan aman [14], [17].



## REFERENCES

- [1] API, API RP 2A-WSD: *Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*. Washington, DC, USA: American Petroleum Institute, 2007.
- [2] R. Bhattacharyya, *Dynamics of Marine Structures*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [3] S. L. Chan and P. P. T. Chui, *Non-linear Static and Cyclic Analysis of Steel Frames*. Oxford, U.K.: Elsevier, 2000.
- [4] R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha, and R. J. Witt, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2002.
- [5] Computers and Structures Inc. (CSI), *SAP2000: Structural Analysis Program, Version 22 – Analysis Reference Manual*. Berkeley, CA, USA, 2020.
- [6] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mechanics of Materials*, 8th ed. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2012.
- [7] R. R. Husaini, M. Yazid, A. D. Islami, T. J. Gunawan, and M. D. Wahyudi, “Analisis Struktur Rangka Batang 2D dengan Metode Matriks Kekakuan,” *Jurnal Rab Construction Research*, vol. 8, no. 2, pp. 322–338, 2023.
- [8] A. Kassimali, *Matrix Analysis of Structures*, 2nd ed. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2012.
- [9] W. McGuire, R. H. Gallagher, and R. D. Ziemian, *Matrix Structural Analysis*, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2000.
- [10] S. Timoshenko and D. H. Young, *Elements of Strength of Materials*. Princeton, NJ, USA: D. Van Nostrand Company, 1965.
- [11] S. T. Zulfikar, *Dasar-Dasar Metode Elemen Hingga untuk Teknik Mesin, Bab 3 Matriks Kekakuan*. Universitas Muhammadiyah Ambarawa, pp. 22–29, 2019.
- [12] J. N. Reddy, *An Introduction to the Finite Element Method*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2006.
- [13] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 7th ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2013.
- [14] T. H. G. Megson, *Structural and Stress Analysis*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2014.
- [15] J. F. Harvey, *Theory and Design of Pressure Vessels*, 2nd ed. New York, NY, USA: Van Nostrand Reinhold, 1985.
- [16] Y. C. Fung and P. Tong, *Classical and Computational Solid Mechanics*. Singapore: World Scientific, 2001.
- [17] W. F. Chen and E. M. Lui, *Structural Stability: Theory and Implementation*. New York, NY, USA: Elsevier, 1987.
- [18] S. S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, 5th ed. Burlington, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [19] D. J. Eyres and G. J. Bruce, *Ship Construction*, 7th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [20] B. M. Das and K. Sobhan, *Principles of Geotechnical Engineering*, 8th ed. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2014.