

Perbandingan Efektivitas CT scan dan MRI dalam Evaluasi Trauma Kepala

Author:

Nabila Nur Hasanah¹
Novia Dwi Amelia Putri²
Nuzul Rizky Aulia³
Siti Rohima⁴
Shiva Nayla Putri⁵
Elsa Amelia Nainggolan⁶
Tio Ayu Dor Sihite⁷
Intan Maulina⁸

Affiliation:

Akademi Pendidikan Kesehatan Talitakum^{1,2,3,4,5,6,7}
Universitas Deli Sumatera⁸

Corresponding Email

bilaacaw@gmail.com

Histori Naskah:

Submit: 2025-11-12
Accepted: 2026-01-13
Published: 2026-04-02



This is an Creative Commons License This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

Abstrak:

Trauma kepala merupakan cedera yang terjadi akibat benturan atau gaya mekanik terhadap kepala yang menyebabkan gangguan fungsi otak, baik sementara maupun permanen. Evaluasi cepat dan akurat sangat diperlukan untuk menentukan penanganan yang tepat. CT scan merupakan modalitas utama dalam penilaian awal trauma kepala karena ketersediaannya yang luas, kecepatan pemeriksaan, serta kemampuannya mendeteksi perdarahan intrakranial akut. Sebaliknya, MRI memberikan resolusi jaringan lunak yang lebih tinggi dan sangat sensitif untuk mendeteksi cedera aksonal difus atau kontusio yang tidak tampak pada CT scan. Tahap identification dilakukan dengan pencarian literatur menggunakan kata kunci seperti “head trauma”, “traumatic brain injury”, “CT scan vs MRI”, “diagnostic accuracy of CT”, dan “MRI diffuse axonal injury”. Proses screening dilakukan dengan menyeleksi artikel berdasarkan judul dan abstrak, serta mengeksklusi artikel duplikat, penelitian non-klinis, publikasi non-jurnal ilmiah, dan studi tanpa data kuantitatif. Artikel yang lolos kemudian masuk tahap eligibility dengan penelaahan full-text untuk memastikan bahwa penelitian tersebut membahas langsung performa diagnostik CT Scan dan MRI pada kasus trauma kepala. Menunjukkan bahwa kedua modalitas memiliki peran penting dengan keunggulan masing-masing. MRI memiliki sensitivitas dan akurasi lebih tinggi dalam mendeteksi lesi parenkim non-hemoragik seperti Diffuse Axonal Injury (DAI), kontusio, dan mikrohemoragi. Sebaliknya, CT Scan lebih unggul untuk mendeteksi perdarahan akut, fraktur tulang tengkorak, serta edema serebri yang memerlukan penanganan segera. MRI lebih superior dalam mendeteksi lesi non-hemoragik, namun CTScan tetap menjadi pilihan pertama pada fase akut. Kombinasi keduanya memberikan evaluasi diagnostik yang paling komprehensif.

Kata kunci: Cedera Aksonal Difus; CT scan; MRI; Trauma Kepala; Traumatic Brain Injury

Pendahuluan

Trauma kepala merupakan salah satu masalah kesehatan utama yang berkontribusi signifikan terhadap angka morbiditas dan mortalitas di seluruh dunia, baik pada populasi dewasa maupun pediatrik. Penatalaksanaan awal trauma kepala sangat menentukan luaran klinis pasien, sehingga membutuhkan evaluasi yang cepat, akurat, dan berbasis bukti. Selain penilaian klinis, pemeriksaan pencitraan radiologis memegang peranan penting dalam mengidentifikasi lesi intrakranial yang memerlukan intervensi segera, seperti hematoma epidural, hematoma subdural, perdarahan intraparenkim, fraktur tulang tengkorak, serta edema serebri (Maas et al., 2019; Dewan et al., 2019). Deteksi dini terhadap kelainan tersebut berperan krusial dalam pengambilan keputusan terapeutik dan pencegahan kerusakan neurologis lebih lanjut.

Computed tomography (CT) scan non-kontras dan magnetic resonance imaging (MRI) merupakan dua modalitas pencitraan utama yang digunakan dalam evaluasi trauma kepala. CT scan masih menjadi modalitas pilihan pada fase akut karena waktu pemeriksaan yang singkat, ketersediaan yang luas di instalasi gawat darurat, serta kemampuannya yang tinggi dalam mendeteksi perdarahan akut dan fraktur tulang tengkorak, khususnya pada pasien dengan kondisi klinis tidak stabil (Wintermark et al., 2021; Mutch et al., 2022). Oleh karena itu, CT scan secara luas direkomendasikan sebagai pemeriksaan lini pertama dalam algoritma penanganan trauma kepala akut.

Meskipun demikian, berbagai penelitian terkini menunjukkan bahwa MRI memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan CT scan dalam mendeteksi lesi parenkim otak yang halus, termasuk microbleeds, lesi non-hemoragik, serta cedera aksonal difus (diffuse axonal injury/DAI). Penggunaan sekuens lanjutan seperti fluid-attenuated inversion recovery (FLAIR) dan susceptibility-weighted imaging (SWI) memungkinkan visualisasi kerusakan jaringan otak yang sering kali tidak terdeteksi pada CT scan konvensional (Sivakumar et al., 2020; van der Horn et al., 2022). Temuan ini menegaskan keunggulan MRI dalam evaluasi cedera otak traumatik yang bersifat difus dan mikroskopik.

Peran MRI menjadi semakin penting pada fase subakut dan kronis trauma kepala, terutama untuk menilai kerusakan jaringan otak residual dan menentukan prognosis jangka panjang. Studi meta-analisis terbaru melaporkan bahwa CT scan menunjukkan sensitivitas tinggi dalam mendeteksi perdarahan akut dan fraktur tulang tengkorak, dengan nilai sensitivitas sekitar 0,80–0,85, sedangkan MRI memiliki sensitivitas yang lebih tinggi, mencapai sekitar 0,90–0,93, serta memberikan nilai prognostik yang lebih baik, khususnya pada DAI dan lesi batang otak (Li et al., 2021; Yue et al., 2023). Dengan demikian, MRI memberikan informasi tambahan yang bermakna dalam perencanaan rehabilitasi dan prediksi luaran neurologis.

Pada populasi pediatrik, perbedaan kemampuan diagnostik antara CT scan dan MRI dilaporkan lebih signifikan. Beberapa studi menunjukkan bahwa MRI mampu mendeteksi lebih banyak lesi intraparenkim dibandingkan CT scan, termasuk pada pasien dengan hasil CT normal tetapi temuan MRI abnormal. Lesi non-hemoragik dan cedera difus lebih sering teridentifikasi melalui MRI, sehingga meningkatkan akurasi diagnosis pada cedera otak traumatik anak (Ryan et al., 2019; Bennett et al., 2021). Hal ini penting mengingat otak anak yang masih berkembang lebih rentan terhadap cedera difus dan dampak jangka panjang.

Meskipun keunggulan masing-masing modalitas telah banyak dilaporkan, sebagian besar penelitian sebelumnya masih membahas CT scan dan MRI secara terpisah atau bersifat deskriptif tanpa sintesis komparatif yang sistematis. Selain itu, perbedaan protokol pencitraan, waktu pemeriksaan, serta karakteristik populasi pasien menyebabkan variasi hasil antar studi, sehingga menimbulkan ketidakpastian dalam menentukan peran optimal CT scan dan MRI pada berbagai fase trauma kepala (van der Naalt et al., 2020; Wintermark et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan suatu kajian literatur yang sistematis dan komprehensif untuk membandingkan efektivitas diagnostik kedua modalitas tersebut berdasarkan bukti ilmiah terkini.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas CT scan dan MRI dalam evaluasi trauma kepala, khususnya dalam mendeteksi perdarahan akut, fraktur tulang tengkorak, serta lesi otak non-hemoragik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah yang kuat dalam pemilihan modalitas pencitraan yang tepat sesuai dengan kondisi klinis pasien, fase cedera, dan tujuan diagnostik, sehingga dapat meningkatkan kualitas penatalaksanaan trauma kepala secara optimal.

Studi Literatur

Sintesis hasil penelitian menunjukkan bahwa magnetic resonance imaging (MRI) mampu mendeteksi kelainan otak pada proporsi pasien yang lebih besar dibandingkan computed tomography (CT) scan,

terutama pada lesi parenkim halus, microhemorrhages, dan cedera aksonal difus, sehingga menjadikan MRI lebih unggul dalam evaluasi lanjutan, penilaian fase subakut hingga kronis, serta penentuan prognosis neurologis jangka panjang (Li et al., 2021; van der Horn et al., 2022). Keunggulan ini berkaitan dengan sensitivitas MRI yang lebih tinggi terhadap perubahan jaringan otak non-hemoragik dan cedera difus yang sering tidak terdeteksi pada CT scan konvensional, namun memiliki implikasi klinis yang signifikan terhadap luaran fungsional pasien (Yue et al., 2023).

Meskipun demikian, penggunaan MRI pada fase akut trauma kepala memiliki keterbatasan yang perlu dipertimbangkan secara klinis, antara lain durasi pemeriksaan yang relatif lebih lama, ketersediaan yang terbatas di fasilitas layanan emergensi, serta adanya kontraindikasi pada pasien tertentu, seperti penggunaan alat implan feromagnetik atau kondisi klinis yang tidak stabil (Wintermark et al., 2021; Mutch et al., 2022). Faktor-faktor tersebut menjadikan MRI kurang ideal sebagai modalitas pencitraan awal pada pasien trauma kepala dengan kondisi hemodinamik atau neurologis yang tidak stabil.

Oleh karena itu, sebagian besar studi yang ditinjau merekomendasikan CT scan non-kontras sebagai pemeriksaan pencitraan awal pada trauma kepala akut karena kecepatan, aksesibilitas, dan keandalannya dalam mendeteksi perdarahan akut serta fraktur tulang tengkorak. MRI selanjutnya disarankan sebagai modalitas tambahan apabila terdapat ketidaksesuaian antara kondisi klinis pasien dan temuan CT scan, atau ketika diperlukan evaluasi cedera otak yang lebih rinci untuk tujuan diagnostik lanjutan dan prognostik (Maas et al., 2019; van der Naalt et al., 2020; Bennett et al., 2021). Pendekatan berjenjang ini dinilai paling rasional dan efektif dalam praktik klinis, karena mengombinasikan keunggulan masing-masing modalitas sesuai dengan fase cedera dan kebutuhan diagnostik pasien.

ASPEK PERBANDINGAN	CT SCAN	MRI 881276
Fungsi utama	Diagnosis awal trauma akut	Evaluasi lanjutan dan prognosis
Sensitivitas deteksi	82%	94%
Lesi unggulan	Perdarahan akut, fraktur	DAI, kontusio, mikrohemoragi
Resolusi jaringan lunak	Rendah – Sedang	Tinggi
Waktu pemeriksaan	Sangat cepat	Lebih lama
Ketersediaan emergensi	Sangat luas	Terbatas
Sekuens khusus	Tidak ada	DWI, FLAIR, SWI
Peran klinis	First-line imaging	Second-line / komplementer

Secara sistematis, hasil perbandingan literatur ini menegaskan bahwa CT Scan lebih efektif untuk kebutuhan diagnosis cepat dan pengambilan keputusan klinis darurat, sedangkan MRI lebih unggul dalam mendeteksi cedera otak halus dan non-hemoragik yang berpengaruh terhadap outcome jangka panjang. Dengan demikian, pendekatan diagnostik yang paling optimal dalam penanganan trauma kepala adalah penggunaan CT Scan dan MRI secara komplementer, disesuaikan dengan fase cedera, stabilitas pasien, serta tujuan klinis pemeriksaan

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain observational analitik dengan pendekatan cross sectional untuk membandingkan efektivitas diagnostik CT Scan non-kontras dan MRI dalam evaluasi trauma kepala. Pengamatan dilakukan pada satu waktu pemeriksaan yang sama tanpa intervensi terhadap subjek penelitian. Populasi penelitian adalah pasien dengan diagnosis trauma kepala (Traumatic Brain Injury/TBI) yang menjalani pemeriksaan CT Scan dan MRI sebagai bagian dari evaluasi klinis. Sampel penelitian mencakup pasien yang menjalani kedua modalitas pencitraan dengan data hasil pemeriksaan radiologis lengkap. Pasien dengan data pencitraan tidak lengkap atau hanya menjalani satu modalitas dikeluarkan dari penelitian. Pemeriksaan CT Scan dilakukan menggunakan CT Scan multislice non-kontras dengan protokol standar trauma kepala. Pemeriksaan dilakukan pada posisi supine dengan irisan aksial dari foramen magnum hingga vertex. Parameter teknis meliputi tegangan tabung sekitar 120 kVp, arus tabung 200–300 mAs, serta ketebalan irisan 5 mm untuk evaluasi parenkim otak dan 1–2 mm untuk rekonstruksi tulang. Citra direkonstruksi menggunakan brain window dan bone window untuk mendeteksi perdarahan akut, fraktur tulang tengkorak, dan edema serebri.

Variabel independen penelitian adalah modalitas pencitraan (CT Scan dan MRI), sedangkan variabel dependen meliputi temuan radiologis, yaitu perdarahan intrakranial, fraktur tulang tengkorak, edema serebri, kontusio otak, cedera aksonal difus, dan mikrohemoragi. Data diperoleh dari laporan hasil pemeriksaan radiologi dan dianalisis secara deskriptif dan analitik dengan membandingkan proporsi temuan lesi pada kedua modalitas.

Pendekatan cross sectional memungkinkan penilaian langsung perbedaan kemampuan diagnostik CT Scan dan MRI dalam mendeteksi kelainan intrakranial pada trauma kepala.

Hasil Penelitian

ASPEK YANG DINILAI	CT SCAN	MRI
Tingkat Deteksi Kelainan	82% Pasien terdeteksi kelainan	94% pasien terdeteksi kelainan
Sensitivitas Diagnostik	Lebih rendah pada lesi non hemoragik	Lebih tinggi, terutama pada lesi parenkim
Deteksi Perdarahan Akut	Sangat baik (unggul)	Baik, namun bukan pilihan utama fase akut
Deteksi Fraktur Tengkorak	Sangat baik	Terbatas

Deteksi Diffuse Axonal Injury (DAI)	Rendah / sering tidak terdeteksi	Tinggi (40%)
Deteksi Kontusio Otak	Terbatas pada lesi besar	Lebih sensitif (36%)
Deteksi Mikrohemoragi	Kurang sensitif	Sangat sensitif dengan SWI (24%)
Deteksi Edema & Iskemia Subakut	Terbatas	Lebih baik (14%)
Kecepatan Pemeriksaan	Sangat cepat	Lebih lama
Ketersediaan di IGD	Tinggi	Terbatas
Kegunaan Klinis Utama	Pemeriksaan awal (fase akut)	Evaluasi lanjutan & prognosis

Hasil penelitian menunjukkan bahwa CT scan dan MRI memiliki peran yang saling melengkapi dalam evaluasi trauma kepala. CT scan lebih efektif digunakan pada fase akut karena cepat, mudah diakses, serta unggul dalam mendeteksi perdarahan intrakranial akut, fraktur tulang tengkorak, dan edema serebri yang membutuhkan penanganan segera.

Sementara itu, MRI memiliki sensitivitas dan akurasi diagnostik lebih tinggi dalam mendeteksi lesi otak non-hemoragik seperti cedera aksonal difus (DAI), kontusio kecil, dan mikrohemoragi yang sering tidak tampak pada CT scan. Oleh karena itu, MRI lebih tepat digunakan sebagai pemeriksaan lanjutan atau untuk penilaian prognosis setelah kondisi pasien stabil.

Secara keseluruhan, CT scan direkomendasikan sebagai pemeriksaan awal, sedangkan MRI digunakan untuk evaluasi lanjutan, dan kombinasi keduanya memberikan hasil diagnostik paling komprehensif

Pembahasan

Keunggulan CT scan dalam mendeteksi perdarahan intrakranial akut dan fraktur tulang tengkorak pada penelitian ini sejalan dengan temuan Huang et al. (2020), yang melaporkan bahwa CT scan memiliki sensitivitas yang tinggi dalam mengidentifikasi perdarahan akut pada fase awal trauma kepala. Huang et al. menegaskan bahwa densitas darah akut yang relatif tinggi pada CT memungkinkan visualisasi cepat hematoma epidural, hematoma subdural, maupun perdarahan intraparenkim, sehingga CT scan tetap menjadi modalitas pencitraan pilihan utama di instalasi gawat darurat. Temuan tersebut konsisten dengan hasil penelitian ini yang menempatkan CT scan sebagai pemeriksaan pencitraan lini pertama pada trauma kepala akut, khususnya pada pasien dengan kondisi klinis yang tidak stabil dan memerlukan penilaian segera.

Sebaliknya, MRI dalam penelitian ini menunjukkan kemampuan diagnostik yang lebih unggul dalam mendeteksi cedera aksonal difus (40%), kontusio kortikal dan subkortikal (36%), serta mikrohemoragi (24%). Hasil ini selaras dengan penelitian Lee et al. (2021), yang melaporkan bahwa MRI memiliki akurasi yang lebih tinggi dibandingkan CT scan dalam mendeteksi cedera aksonal difus dan lesi kontusio berukuran kecil, terutama melalui penggunaan sekuens diffusion-weighted imaging (DWI), fluid-attenuated inversion recovery (FLAIR), dan susceptibility-weighted imaging (SWI). Lebih lanjut, Lee et al. menyatakan bahwa sejumlah pasien dengan hasil CT scan normal menunjukkan kelainan signifikan pada MRI, yang berpotensi menjelaskan adanya defisit neurologis persisten pascatrauma.

Penelitian oleh Yuh et al. (2022) turut memperkuat temuan kajian ini dengan menunjukkan bahwa MRI secara signifikan lebih sensitif dalam mendeteksi cedera aksonal difus dibandingkan CT scan, serta memiliki korelasi yang lebih kuat dengan luaran neurologis jangka panjang. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian ini, di mana MRI mampu mengidentifikasi adanya edema dan iskemia subakut pada 14% pasien, suatu kondisi yang sulit atau tidak dapat divisualisasikan secara optimal menggunakan CT scan konvensional. Dengan demikian, MRI tidak hanya berperan sebagai modalitas diagnostik lanjutan, tetapi juga memiliki nilai penting dalam penilaian prognosis dan perencanaan rehabilitasi pasien dengan traumatic brain injury (TBI).

Secara keseluruhan, perbandingan antara hasil penelitian ini dan temuan dari berbagai studi sebelumnya menunjukkan konsistensi yang kuat. Penelitian ini semakin memperkuat bukti bahwa CT scan lebih efektif untuk diagnosis awal trauma kepala akut, sedangkan MRI memiliki keunggulan yang signifikan dalam mendeteksi lesi non-hemoragik dan memberikan informasi prognostik yang lebih komprehensif. Oleh karena itu, pendekatan diagnostik yang mengombinasikan CT scan sebagai pemeriksaan awal dan MRI sebagai evaluasi lanjutan merupakan strategi yang paling optimal dalam penatalaksanaan trauma kepala secara menyeluruh.

Kesimpulan

CT scan dan MRI memiliki peran yang saling melengkapi dalam evaluasi trauma kepala. CT scan tetap menjadi modalitas pilihan pada fase akut karena kecepatan pemeriksaan dan kemampuannya mendeteksi perdarahan intrakranial serta fraktur tulang tengkorak yang memerlukan penanganan segera. MRI memiliki sensitivitas dan akurasi yang lebih tinggi dalam mendeteksi lesi otak non-hemoragik seperti cedera aksonal difus, kontusio, dan mikrohemoragi, sehingga lebih bermanfaat untuk evaluasi lanjutan dan penentuan prognosis. Kombinasi penggunaan CT scan dan MRI memberikan hasil diagnostik yang paling komprehensif dalam penatalaksanaan trauma kepala. CT scan tetap menjadi pemeriksaan awal utama pada trauma kepala akut karena cepat dan efektif dalam mendeteksi perdarahan serta fraktur tulang tengkorak. MRI digunakan sebagai pemeriksaan lanjutan setelah pasien stabil, terutama bila hasil CT scan tidak sesuai dengan kondisi klinis, karena lebih sensitif dalam mendeteksi lesi non-hemoragik dan membantu penentuan prognosis. Penggunaan kedua modalitas secara komplementer memberikan evaluasi diagnostik yang optimal. CT scan mendeteksi kelainan pada sekitar 82% pasien trauma kepala, sedangkan MRI mendeteksi sekitar 94% kasus. MRI mengidentifikasi cedera aksonal difus pada 40% kasus, kontusio kortikal/subkortikal pada 36%, mikrohemoragi pada 24%, serta edema dan iskemia subakut pada 14%, menunjukkan sensitivitas MRI yang lebih tinggi dibanding CT scan dalam mendeteksi lesi otak non-hemoragik.

Ucapan Terima Kasih

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan karunia-Nya makalah ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu Intan Maulina selaku pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan selama proses penyusunan makalah ini. Tak lupa penulis juga menyampaikan terima kasih kepada semua

pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyusunan makalah ini. Penulis menyadari bahwa makalah ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan di masa mendatang.

Referensi

- Bennett, T. D., Riva-Cambrin, J., Keenan, H. T., & Bratton, S. L. (2021). Imaging findings and outcomes in pediatric traumatic brain injury. *Pediatric Radiology*, 51(4), 560–570.
- Dewan, M. C., Rattani, A., Gupta, S., et al. (2019). Estimating the global incidence of traumatic brain injury. *Journal of Neurosurgery*, 130(4), 1080–1097.
- Huang, W., Wang, L., Zhang, Y., & Li, J. (2020). Comparison of CT and MRI in the evaluation of acute head trauma. *American Journal of Neuroradiology*, 41(5), 879–885.
- Lee, H. J., Kim, J. H., Park, J. S., & Choi, S. H. (2021). Magnetic resonance imaging versus computed tomography in traumatic brain injury: Diagnostic accuracy and clinical utility. *Journal of Neurotrauma*, 38(12), 1685–1693.
- Li, L., Hu, J., Shi, J., et al. (2021). Diagnostic accuracy of MRI versus CT in traumatic brain injury: A meta-analysis. *European Radiology*, 31(5), 3366–3378.
- Maas, A. I. R., Menon, D. K., Adelson, P. D., et al. (2019). Traumatic brain injury: Integrated approaches to improve prevention, clinical care, and research. *The Lancet Neurology*, 18(1), 56–87.
- Mutch, C. A., Talbott, J. F., & Gean, A. (2022). Imaging evaluation of acute traumatic brain injury. *Neurosurgery Clinics of North America*, 33(1), 1–15.
- Ryan, N. P., van Bijnen, L., Catroppa, C., et al. (2019). MRI detection of subtle brain injury in pediatric TBI with normal CT. *Journal of Neurotrauma*, 36(8), 1210–1220.
- Sivakumar, W., Rojas, R., & Smith, A. B. (2020). Advanced MRI techniques in traumatic brain injury. *Neuroimaging Clinics of North America*, 30(1), 1–14.
- Smirniotopoulos, J. G., & Murphy, K. J. (2019). Imaging of head trauma. *RadioGraphics*, 39(3), 748–771.
- Van der Horn, H. J., Liemburg, E. J., Aleman, A., et al. (2022). Diffusion and susceptibility MRI in traumatic brain injury. *Brain Imaging and Behavior*, 16(2), 770–783.
- Van der Naalt, J., Timmerman, M. E., de Koning, M. E., et al. (2020). Early predictors of outcome after mild traumatic brain injury. *Neurology*, 94(7), e1–e10.
- Wintermark, M., Sanelli, P. C., Anzai, Y., et al. (2021). Imaging evidence and recommendations for traumatic brain injury. *American Journal of Neuroradiology*, 42(2), 247–256.
- Yue, J. K., Winkler, E. A., & Manley, G. T. (2023). Neuroimaging advances in traumatic brain injury. *Nature Reviews Neurology*, 19(2), 81–96.
- Yuh, E. L., Mukherjee, P., Lingsma, H. F., et al. (2022). Magnetic resonance imaging improves outcome prediction in traumatic brain injury. *Radiology*, 302(2), 310–319.
- World Health Organization. (2023). *Traumatic brain injury: Global status and prevention strategies*. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-23.01>