مجلة علوم البحار والتقنيات البيئية
المجلد (11)، العدد (2) (ديسمبر-2025)

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

DOI: https://doi.org/10.59743/jmset.v11i2.184

تحليل استقرار السفن باستخدام معادلات التوازن الطولي والجانبي: تطبيق على السفينة الليبية أنوار أفريقيا

حمزة مفتاح رجب*، بالقاسم محمد الأعوج، و عبد السلام رمضان دلف

قسم هندسة الميكانيكا البحرية، كلية الموارد البحرية، الجامعة الأسمرية الإسلامية، زليتن، ليبيا.

*البريد الإلكتروني: h.rajab@asmarya.edu.ly

Analysis of Ship Stability Using Longitudinal and Transverse Equilibrium Equations: A Practical Application on the Libyan Vessel ANWAAR AFRQYA

Hamza M. Rajab*, Belkasem Mohammed Alawage, and Abdelssalam Ramadhan Daleef

Department of Marine Mechanical Engineering, Faculty of Marine Resources,
Alasmarya Islamic University, Zliten, Libya.

Received: 29 July 2025; Revised: 20 August 2025; Accepted: 30 August 2025.

الملخص

تُعد مسألة توزيع الحمولة داخل السفن ولا سيما ناقلات النفط، من العوامل الأساسية التي تؤثر بشكل مباشر على استقرارها وسلامة إبحارها، خصوصًا في ظل التغيرات المستمرة في أنماط الشحن والتصاميم البحرية الحديثة، ورغم وجود معايير تنظيمية عامة إلا أن الحوادث البحرية لا تزال تُشير إلى وجود فجوات في فهم العلاقة الدقيقة بين توزيع الكتلة الطولية والعرضية ومدى تأثيرها على الاستقرار الديناميكي والثابت للسفن. وانطلاقًا من هذه الإشكالية هدفت هذه الدراسة إلى تحليل استقرار السفن البحرية من خلال الاعتماد على النمذجة الرياضية لمعادلات التوازن الطولي والعرضي، وتطبيق ذلك على ناقلة النفط الليبية "أنوار أفريقيا" كنموذج واقعي. يُعد كل من معامل الاستقرار GM وذراع الاستعادة GZ من أهم المؤشرات المستخدمة لتقييم قدرة السفينة على مقاومة الميل والانقلاب تحت تأثير القوى البحرية المختلفة. تم استخدام البيانات الفعلية للسفينة لتقدير الحجم المغمور وعزم القصور الذاتي العرضي، مما أتاح حساب نصف قطر الطفو ومعامل GM عند ظروف تحميل متعددة. وقد أظهرت النتائج أن السفينة تكون غير مستقرة عندما يرتفع مركز الثقل بشكل كبير فوق مركز الطفو، بحيث يقع أعلى من النقطة المتريّة M، مما يؤدي إلى قيمة سالبة لمعامل GM، مما يزيد من احتمالية أكبر للانقلاب، خاصة عند زوايا ميل التي تتجاوز 15°. وفي المقابل يؤدي خفض مركز الثقل إلى مستويات مناسبة إلى تحسن ملحوظ في الاستقرار، مع بقاء ذراع الاستعادة GZ ضمن الحدود الآمنة. وتخلص الدراسة إلى أهمية التحكم الدقيق في توزيع الأحمال، والاستفادة من أنظمة التوازن الديناميكية، خاصة في السفن ذات البنية الطولية والغاطس العميق، كما تؤكد على فاعلية النمذجة الرياضية في دعم القرار الهندسي أثناء التصميم والتشغيل.

الكلمات الدالة: الاستقرار، التوازن الجانبي، الطفو، ناقلات النفط، هيكل السفينة.

Abstract

Load distribution within ships, particularly oil tankers, is a fundamental factor that directly impacts their stability and navigational safety, especially in light of the ongoing changes in shipping patterns and modern marine designs. Despite the existence of general regulatory standards, maritime accidents still indicate gaps in understanding the precise relationship between longitudinal and transverse mass distribution and its impact on the dynamic and static stability of ships. Based on this problem, this study aimed to; analyze the stability of marine vessels by applying mathematical modeling of longitudinal and transverse equilibrium equations, using the Libyan oil tanker ANWAAR AFRQYA as a real-world case study. The metacentric height (GM) and the righting arm (GZ) are key

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

indicators used to assess a ship's ability to resist heeling and capsizing under various maritime forces. Based on the vessel's actual specifications, the submerged volume and transverse moment of inertia were estimated to calculate the metacentric radius and GM under different loading conditions. The results showed that a ship is unstable when the center of gravity is significantly higher than the center of buoyancy. The center of gravity is higher than the metacenter (M), and the GM value becomes negative, indicating a tendency to capsize, which increases the possibility of a rollover, especially at angles of inclination exceeding 15°. When the center of gravity was lowered to more appropriate levels, the stability improved significantly, with GZ values remaining within safe limits. This study highlights the importance of load distribution and dynamic ballast systems, particularly for deep-draft, longitudinally-structured tankers. It also emphasizes the value of mathematical models in supporting engineering decisions during both design and operational phases.

Keywords: *Buoyancy, Lateral stability, Oil tankers, Ship structure, Stability.*

1. المقدمة

يلعب استقرار السفن دورًا حاسمًا في ضمان سلامة الإبحار وكفاءة التشغيل البحري، إذ ترتبط بشكل مباشر بقدرة السفينة على مقاومة قوى الميل والانقلاب الناتجة عن الرياح، الأمواج، أو سوء توزيع الحمولة. ويتأثر هذا العامل بعلاقات هندسية دقيقة تتعلق بموقع مركز الثقل ومركز الطفو، إلى جانب شكل بدن السفينة وتوزيع الأحمال الداخلية (الجبالي، 2019).

في السياق الهندسي، يتم تقييم استقرار السفن من خلال عدد من المؤشرات الفنية، أبرزها معامل الارتفاع المتري (GM) وذراع الاستعادة (GZ)، اللذان يتيحان تحليل سلوك السفينة في مختلف زوايا الميل. ويُعد هذا التحليل ضروريًا ليس فقط في مرحلة التصميم، بل أيضًا أثناء التشغيل الفعلي، خصوصًا في السفن ذات الاستخدام التجاري مثل ناقلات النفط، التي تتعرض لتغيّرات دائمة في توزيع الأحمال والسوائل داخل الخزانات (الحسن، 2020).

تسعى هذه الدراسة إلى تطبيق معادلات الاستقرار الطولي والجانبي على نموذج حقيقي متمثل في السفينة الليبية أنوار افريقيا (ANWAAR AFRQYA)، وذلك بهدف تقييم أدائها تحت ظروف تشغيل واقعية، وتحليل مدى ملاءمة توازنها عند تغيّر زاوية الميل. ومن خلال هذا التطبيق، سيتم تحديد العوامل المؤثرة على الاستقرار، واقتراح وسائل تحسينه بما يتوافق مع المعايير البحرية الدولية ومتطلبات السلامة.

2. الدراسات السابقة

تناولت دراسة Sakuma & Naruse (2015) تحليل تأثير ارتفاع مركز الثقل على معامل الاستقرار في السفن التجارية، وأظهرت أن الزيادة الطفيفة في ارتفاع مركز الثقل تؤدي إلى انخفاض كبير في قيمة GM، مما يقلل من استقرار السفينة عند زوايا الميل الصغيرة.

قام Abankwa *et al.* (2018) بتطوير طريقة تجريبية لتقدير موقع مركز الطفو الطولي (Longitudinal Center of Flotation) للسفن باستخدام قياسات التسارع في ظروف بحرية متغيرة. وركزت الدراسة على دمج الحساسات الحركية عند مقدمة ومؤخرة السفينة بهدف متابعة تأثير الأمواج المستمرة على استقرار السفينة، وقد خلصت النتائج إلى أن هذا النوع من القياسات يمكن أن يعزز التحكم في عمليات تحميل السفينة، مما يقلل من المخاطر المرتبطة بالميل الطولي الزائد.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

وفي مراجعة علمية شاملة، أجرى Schreuder *et al.* (2018) تحليلًا للاتجاهات الحديثة في أبحاث استقرار السفن والمركبات البحرية. وأكدت نتائج الدراسة أن دمج المعادلات الطولية والجانبية في التحليل الاستقراري يوفر تمثيلًا أكثر واقعية لأداء السفن، خاصة عند دراسة حالات الانقلاب نتيجة الأحمال غير المتماثلة أو الظروف البحرية القاسية.

وتناول Pérez-Canosa *et al.* (2022) نموذجًا رياضيًا لدراسة تأثير ظروف البحر، وحالة الحمولة، والمعايير الملاحية على حركة السفينة، باستخدام تحليل ديناميكي متكامل لحركة التدحرج. وقد أظهرت النتائج أن هناك علاقة خطية واضحة بين مقدار الحمولة وتغير ذراع الاستعادة (GZ)، مما يؤثر بشكل مباشر على التوازن الجانبي.

واستعرضت Splash Maritime (2023) دور أنظمة التوازن (Ballast Systems) في تعزيز الاستقرار الطولي والجانبي للسفن، لا سيما أثناء عمليات التفريغ أو التحميل الجزئي. وقد أكدت الوثيقة أن أنظمة الخزانات الطولية والعرضية تسهم في تقليل آثار ظاهرة السطح الحر، وتدعم الحفاظ على موضع مناسب لمركز الثقل بما يضمن ثبات السفينة.

كما ركزت دراسة Alamsyah *et al.* (2025) على تحليل الاستقرار الثابت والديناميكي لسفن الصيد الصغيرة من نوع (liftnet)، حيث تناولت تأثير التوزيع غير المتوازن للوزن على التوازن الطولي والجانبي. وقد أظهرت النتائج أن هذه السفن حساسة للغاية لأي خلل في توزيع الحمولة، مما يعزز أهمية إدارة الحمولة بدقة في هذا النوع من السفن.

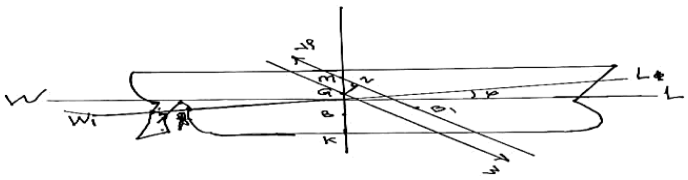
3. الجانب النظري

يستند تحليل استقرار السفن إلى مجموعة من المفاهيم الفيزيائية والهندسية التي تُستخدم لتقييم قدرة السفينة على مقاومة قوى الميل والانقلاب. ويمثل كل من مركز الثقل، مركز الطفو، وذراع الاستعادة مفاتيح أساسية لفهم توازن السفينة تحت تأثير الأحمال والعوامل البحرية المختلفة.

1.3. مفهوم الاستقرار البحري

يشير الاستقرار إلى قدرة وفاعلية السفن أو الهياكل البحرية على العودة إلى وضعها العمودي الأصلي بعد تعرضها للانحراف بفعل قوة خارجية، كالأمواج أو الرياح وهو الميل الذي يعبر عنه بالاصطلاح "Heel"، أو ما يحدث للسفينة من إمالة نتيجة عدم تساوي الأوزان على جانبي منتصف السفينة والذي يعرف "List". ويتم التمييز بينهما كالتالي (الناظوري، 1990):

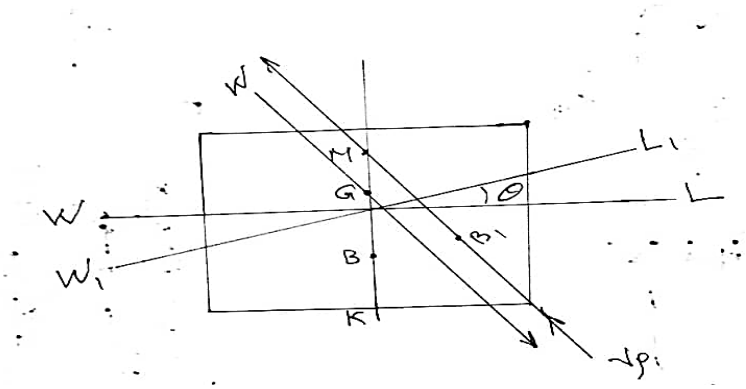
الاستقرار الطولي: وهو المتعلق بميلان السفينة للأمام والخلف (الشكل 1).



شكل 1. الميل الطولي للسفينة

الاستقرار الجانبي (العرضي): ويصف الميل الجانبي للسفينة لليمين أو اليسار (الشكل 2).

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966



شكل 2. الميل الجانبي للسفينة

كلا النوعين يخضع لتحليل هندسي باستخدام معادلات توازن تعتمد على شكل السفينة وتوزيع كتلتها.

2.3. التعريفات والمفاهيم الخاصة بدراسة الاستقرار

مركز الثقل (G): ويتمثل عنده وزن السفينة بالكامل، ويعتمد على توزيع الأحمال داخلها.

مركز الطفو (B): هو المركز الهندسي للجزء المغمور لبدن السفينة، والذي يمثل جميع قوى الطفو ويكون تأثيره عموديا للأعلى. وكلما كان مركز الثقل منخفضًا، كان الاستقرار أفضل، لأن الفرق الرأسي بين B و G يُحدد ما يُعرف بالارتفاع المتري (GM).

المركز المتري (M): وهو نقطة تقاطع خطي عمل متتاليين لقوة الطفو، وهي نقطة ثابتة لزوايا الميل الصغرى إلى عند 15° ويعرف أيضا بأنه مركز الدرفلة العرضي.

الارتفاع البيني للمركز المتري (KM): وهو المسافة الراسية بين قاع السفينة أو ما يسمى بـــ(الأرينة) والتي يرمز لها بالحرف (K) والمركز المتري للسفينة (M).

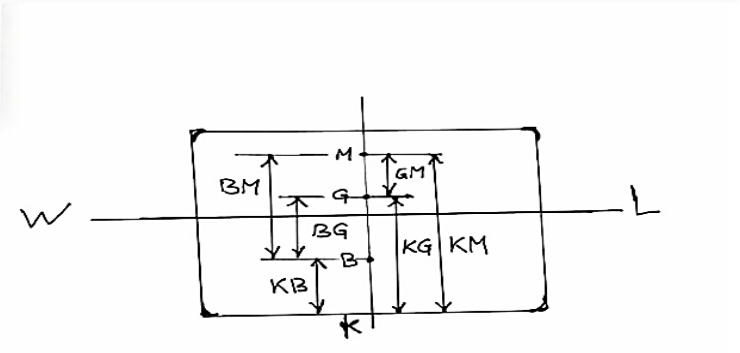
ارتفاع مركز الطفو (KB): وهي المسافة الراسية بين قاع السفينة (الأرينة) ومركز طفو السفينة.

ارتفاع مركز الثقل (KG): وهي المسافة الراسية ما بين قاع السفينة ومركز ثقل السفينة.

ارتفاع الميتاسنتر (GM): هو المسافة الرأسية بين مركز الثقل (G) والمركز المتري أو (الميتاسنتر) (M).

نصف قطر الميتاسنتر (BM): هو الارتفاع ما بين مركز الطفو والمركز المتري للسفينة.

الشكل (3) يبين أهم الارتفاعات والمسافات الرأسية لاستقرار السفينة (الناظوري، 1990).



شكل 3. أهم الارتفاعات والمسافات الرأسية لاستقرار السفينة

مجلة علوم البحار والتقنيات البيئية
المجلد (11)، العدد (2) (ديسمبر–2025)
رجب وآخرون، 2025
ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

3.3. معاملات ومعادلات استقرار السفينة

وهي المعادلات التي يحسب بواسطتها استقرار السفينة، فإذا كان ارتفاع الميتاسنتر (GM) هو مقياس اتزان السفينة، وأن الارتفاع البيني للميتاسنتر (KM) يمكن حسابه رياضيا إذ أنها حاصل جمع المسافتين (KB) و (BM). وكل منهما يمكن حسابهما عند غاطس معين، أما المسافة (KG) فيمكن إيجادها عمليا بواسطة تجربة الميل عند الإزاحة الخفيفة للسفينة، أما المسافة (KG) عند أي حالة شحن فيمكن إيجادها بأخذ العزوم للإزاحة الخفيفة والشحنات حول الأرينة (الناظوري، 1990).

مما تقدم يتضح بأن ارتفاع المركز المتري (الميتاسنتر) يحسب عند أي حالة شحن بمعرفة كل من (KM) و (KG)، وجميعها تُحسب كالتالي:

$$KM = KB + BM \quad \ldots\ldots (1)$$
$$KG = KM - GM \quad \ldots\ldots (2)$$
$$GM = KM - KG \quad \ldots\ldots (3)$$
$$GM = BM - BG \quad \ldots\ldots (4)$$

BM: هي المسافة الرأسية بين المركز المتري (M)، ومركز الطفو (B) وتعرف بالارتفاع الميتاسنتري، وهي تعرف بنصف قطر الطفو العرضي، وتُحسب وفق المعادلة (5):

$$BM = \frac{I}{V} \quad \ldots\ldots (5)$$

حيث أن؛

I : عزم القصور العرضي لسطح الماء

V : حجم الجزء المغمور من السفينة

BG : المسافة بين مركز الطفو ومركز الثقل.

وتعتبر قيمة GM تمثل أحد أهم مؤشرات الاستقرار (أبو عيسى، 2014)، حيث:

- إذا كانت موجبة فإن السفينة مستقرة.
- إذا كانت صفرًا فإن السفينة في حالة توازن محايد.
- إذا كانت سالبة فإن السفينة غير مستقرة.

4.3. ذراع الاستعادة (GZ)

تُعرف GZ بأنها المسافة الأفقية بين مركز الثقل وخط الطفو الجديد عند ميل السفينة، وتُحسب للشكل (4) وفق المعادلة (6):

$$GZ = GM \times sin\theta \quad \ldots\ldots (6)$$

حيث أن:

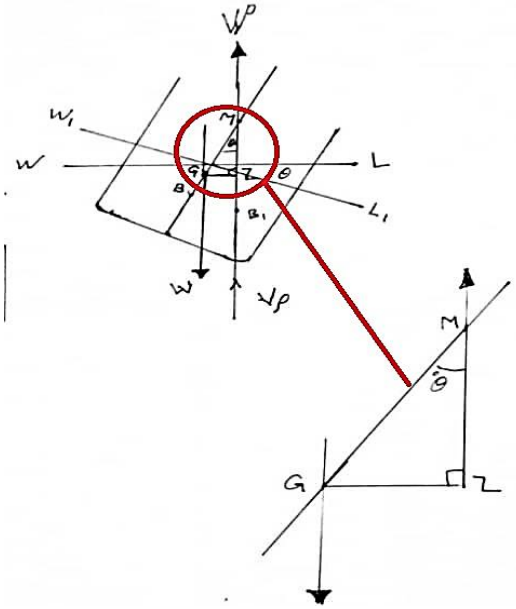
Θ : زاوية الميل (بدرجة أو راديان)

كلما زادت قيمة GZ، زادت قدرة السفينة على العودة إلى وضعها المستقيم (أبو عيسى، 2014).

5.2 تأثير زاوية الميل

زاوية الميل هي العامل المتغير الأساسي في تقييم سلوك GZ. ففي الزوايا الصغيرة (حتى 15°)، تكون العلاقة بين GZ وزاوية الميل تقريبًا خطية، بينما في الزوايا الكبيرة، تصبح العلاقة غير خطية وقد تؤدي إلى انقلاب (الشيباني، 2015).

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966



شكل 4. الرسم التوضيحي لحساب ذراع الاستعادة

6.2. العوامل المؤثرة على الاستقرار

- ارتفاع مركز الثقل نتيجة الأحمال المرتفعة.
- ضيق عرض السفينة مقارنة بطولها.
- غياب أنظمة الاتزان الديناميكي (Ballast).
- تغيّر كثافة السائل المحيط (مياه مالحة مقابل مياه عذبة).
- سرعة السفينة وتأثير الحركة الديناميكية.

7.2. نماذج التقييم النظري لاستقرار السفن

تعتمد النماذج النظرية في تقييم استقرار السفن على تمثيل العلاقات الفيزيائية بين مكونات السفينة وقوى الطفو وقوى الجاذبية، عبر معادلات رياضية تُمكّن من التنبؤ بسلوك السفينة في حالات الميل المختلفة. وتمثل هذه النماذج الأساس في تحليل الأداء البحري سواء في التصميم أو التشغيل (الفرجاني، 2016) وهي كالتالي:

1.7.2. نموذج ذراع الاستعادة (Righting Arm Model):

يُعد من أبسط وأكثر النماذج استخدامًا، ويقوم على المعادلة (3). ويُستخدم هذا النموذج لتقدير ذراع الاستعادة عند زوايا ميل صغيرة إلى متوسطة (عادة حتى 30°). ويُمكن من خلاله رسم منحنى GZ مقابل θ لمعرفة زاوية الميل القصوى الآمنة قبل حدوث انقلاب.

2.7.2. نموذج منحنى الاستقرار الديناميكي (Dynamic Stability Curve):

يركّز على التكامل العددي لقيم GZ عبر مدى زوايا الميل، للحصول على مؤشر الاستقرار الديناميكي وفق المعادلة (7):

$$GZ(\theta)d\theta \int_{\theta_1}^{\theta_2} = \text{Area under GZ curve} \quad \ldots\ldots \quad (7)$$

كلما كانت هذه المساحة أكبر، كانت السفينة أكثر قدرة على مقاومة الميل طويل الأمد أو المتكرر بفعل الأمواج.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

3.7.2. نموذج العلاقة بين GM وسلوك السفينة في الأمواج:

يقوم هذا النموذج على دراسة العلاقة بين معامل الاستقرار GM وسرعة الاستجابة لاضطرابات الأمواج. السفينة ذات قيمة GM مرتفعة يكون لها تردد تمايلي (Roll Frequency) عالٍ، مما يؤدي إلى حركات سريعة لكنها قصيرة. أما السفن ذات GM منخفض فتكون أكثر عُرضة للتمايل العميق والبطيء.

4.7.2. نموذج الحالة الحدية (Limit State Model):

يركز على تحديد زاوية الميل التي عندها تصبح قيمة GZ=0. عند هذه الزاوية تفقد السفينة توازنها وتكون عرضة للانقلاب، ويُستخدم هذا النموذج في تقييم سيناريوهات الطوارئ.

5.7.2. النمذجة العددية باستخدام البرمجيات:

تُترجم النماذج السابقة إلى نمذجة عددية بواسطة برامج متخصصة، مثل:

- Maxsurf Stability: يُستخدم لرسم منحنيات GZ وتحليل استقرار السفينة في حالات مختلفة.
- NAPA Stability: يوفر تقييمًا متقدمًا للاستقرار في الوقت الحقيقي.
- SPSS/Excel: يُستخدمان أكاديميًا في التحليل الإحصائي لقيم GZ وGM، خاصة عند اختبار سيناريوهات متعدّدة.

3. المنهجية

اعتمدت هذه الدراسة على المنهج التحليلي النظري، الذي يقوم على استخدام النمذجة الرياضية لتفسير استقرار السفينة عند تغير ظروف التشـــغيل والزوايا الجانبية للميل. وقد تم تطبيق هذا المنهج على حالة واقعية ممثلة في ناقلة المنتجات النفطية الليبية (ANWAAR AFRQYA)، من خلال استخدام بياناتها الفعلية لاشتقاق المعاملات الهندسية المطلوبة، وحساب مؤشرات الاستقرار المختلفة.

1.3. منهج التحليل الهندسي الرياضي

تضمنت هذه المرحلة حساب المؤشرات التالية:

- **حجم الجزء المغمور للســـفينة (V):** تم تقديره باســـتخدام العلاقة التقريبية التي تربط الطول والعرض والغاطس بمعامل الامتلاء الهندسي(Block Coefficient) ، المناسب لناقلات النفط.
- **عزم القصور العرضي للمقطع (I):** حُسب باستخدام العلاقات الكلاسيكية الخاصة بالمستطيلات البحرية التقريبية.
- **نصف قطر الطفو (BM) :**اشتُق من المعادلة السابقة رقم (5).
- **الارتفاع المتري (GM):** تم حسـابه وفق المعادلة السـابقة رقم (3)، حيث تم افتراض عدة قيم لموضـع مركز الثقل BG لتمثيل سيناريوهات مختلفة.
- **ذراع الاستعادة (GZ):** حُسب باستخدام المعادلة السابقة رقم (6) لمجموعة من زوايا الميل من 0° إلى 30°.

2.3. دراسة السيناريوهات

تم تحليل حالتين رئيسيتين:

- **الحالة الأولى:** تمثّل الوضع الأصلي للسفينة بارتفاع تقريبي لمركز الثقل، وقد أظهرت هذه الحالة قيمة سالبة لمعامل GM، مما يشير إلى عدم الاستقرار الجانبي.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

- **الحالة الثانية:** تم خفض مركز الثقل تدريجيًا لمحاكاة تأثير إعادة توزيع الحمولة أو تحسين تصميم التوازن، مع متابعة تغير قيم GZ ومقارنتها.

3.3. أدوات التحليل

تم استخدام برامج Excel في العمليات الحسابية ورسم منحنيات الاستقرار، مع إعداد جداول للقيم الناتجة وتحليل اتجاهات التغير. كما تم تصميم نموذج جدول لتحليله لاحقًا في برنامج SPSS بغرض ربط زاوية الميل بذراع الاستعادة بطريقة إحصائية.

4.3. معايير التقييم

استُخدمت قيمة GM كمؤشر أولي لتحديد نوع الاستقرار (موجب: مستقر، صفر: توازن محايد، سالب: غير مستقر). كما تم تحليل قيمة GZ عند زوايا الميل المختلفة للحكم على مدى قدرة السفينة على استعادة توازنها. وتم تحديد زاوية فقدان الاستقرار عند النقطة التي تصبح فيها GZ=0.

4. الجانب التطبيقي

يركز هذا القسم على تطبيق المعادلات النظرية لاستقرار السفن على حالة واقعية، وهي ناقلة المنتجات النفطية الليبية (ANWAAR AFRQYA)، وذلك لتحليل مدى استقرارها الجانبي عند تغيّر زاوية الميل، وتحت فرضيات مختلفة لموضع مركز الثقل، وفقا للتالي:

البيانات الفنية للسفينة المدروسة:

جدول 1. بيانات السفينة الليبية أنوار أفريقيا

الخاصية	القيمة	الوحدة
الطول الكلي (LOA)	171.2	متر
العرض (Beam)	27.4	متر
الغاطس (Draught)	11.8	متر
الحمولة الوزنية (DWT)	34,656	طن
معامل الامتلاء التقريبي (Cb)	0.83	--

حساب حجم الجزء المغمور (V):

$$V = L \times B \times T \times C_b \quad \ldots\ldots \quad (8)$$
$$V = 171.2 \times 27.4 \times 11.8 \times 0.83 = 45942.48\ m^3$$

حساب عزم القصور العرضي للمقطع (I):

$$I = \frac{D \times B^3}{12} \quad \ldots\ldots \quad (9)$$
$$I = \frac{27.4 \times 11.8^3}{12} = 3751.59\ m^3$$

حساب نصف قطر الطفو (BM):

$$BM = \frac{I}{V} \quad \ldots\ldots \quad (10)$$

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966
رجب وآخرون، 2025

$$BM = \frac{3751.59}{45942.48} = 0.082$$

دراسة موضع مركز الثقل (BG):

جدول 2. المعطيات الأساسية

الرمز	القيمة	الوحدة
BM	0.082	متر
زوايا الميل المدروسة **θ**	°0، °10، °15، °20، °30	درجة

الحالة الأولى: مركز الثقل مرتفع (BG = 1.8 m)

$GM = BM - BG$
GM = 0.082-1.8 = -1.718m
$GZ = GM \times \sin\theta$

جدول 3. نتائج حسابات الحالة الأولى لزوايا الميل المحددة

زاوية الميل	GZ
0	0.000
10	0.298-
15	0.445-
20	0.588-
30	0.859-

وفق هذا السيناريو فإن السفينة غير مستقرة، لأن GM أصغر من 0 وGZ أصغر من 0 عند كل الزوايا.

الحالة الثانية: مركز الثقل منخفض (BG = 0.05 m)

$GM = BM - BG$
GM = 0.082-0.05 = 0.032m
$GZ = GM \times \sin\theta$

جدول 3. نتائج حسابات الحالة الثانية لزوايا الميل المحددة

زاوية الميل	GZ
0	0.000
10	0.056
15	0.083
20	0.110
30	0.160

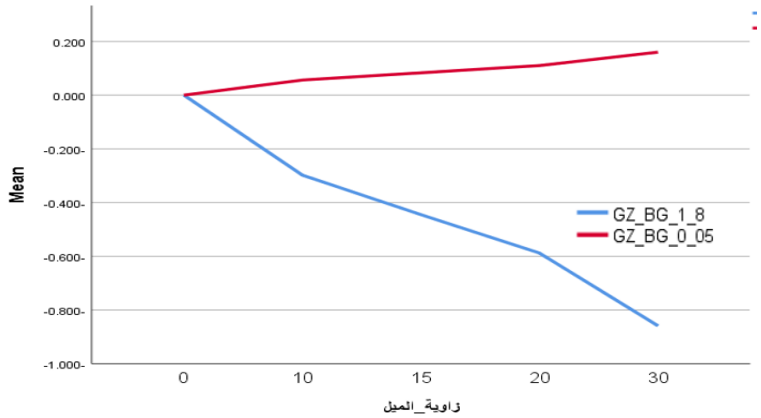
السفينة مستقرة في هذا السيناريو، لأن GM أكبر من 0 وGZ أكبر من 0 عند كل الزوايا.

2.3 التحليل في SPSS

لدراسة العلاقة بين زاوية الميل وذراع الاستعادة GZ في حالتين مختلفتين لموضع مركز الثقل وهي حالة غير مستقرة (عندما BG= 1.8 m) وحالة مستقرة عندما (BG = 0.05 m). الشكل (1) يوضح رسمًا بيانيًا لخطّي تغير ذراع الاستعادة GZ بالنسبة لزاوية الميل في الحالتين حيث أن الخط الأزرق (GZ) عند BG=1.8؛ يمثل حالة مركز ثقل مرتفع وتتجه القيم نحو السالب

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

مع زيادة الزاوية، مما يعكس حالة عدم اســتقرار. أما الخط الأحمر (GZ) عند BG=0.05؛ يمثل حالة مركز ثقل منخفض والقيم تبقى موجبة وتزداد تدريجيًا، مما يدل على استقرار تدريجي وآمن. ونستنتج وجود اختلاف كبير في سلوك GZ بين الحالتين، ويُظهر الرسم أن خفض مركز الثقل يحسن قدرة السفينة على مقاومة الميل.



شكل 5. الرسم البياني الخطّي لتغير ذراع الاستعادة GZ بالنسبة لزاوية الميل

والشــكل (6) يعرض تحليل معامل الارتباط (Pearson Correlation) بين GZ عند BG=1.8 وGZ عند BG=0.05. وكان معامل الارتباط = −1.000 وهي علاقة عكسـية تامة بين GZ في الحالتين. والدلالة الإحصـائية =Sig. 0.000أي أن الفرق معنوي جدًا عند مستوى 0.01 وهنالك علاقة موثوقة إحصائيًا.

شكل 6. تحليل معامل الارتباط (Pearson Correlation) باستخدام SPSS

Correlations

		GZ_BG_1_8	GZ_BG_0_05
GZ_BG_1_8	Pearson Correlation	1	-1.000-**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	5	5
GZ_BG_0_05	Pearson Correlation	-1.000-**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	5	5

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

4. النتائج والمناقشة

أظهرت الحسـابات النظرية المسـتندة إلى معادلات الاسـتقرار البحري أن قيمة نصـف قطر الطفو (BM) لناقلة ANWAAR AFRQYA تبلغ حوالي 0.082 متر، وهي قيمة منخفضة نسبيًا مقارنة بطول السفينة وعرضها، مما يشير إلى حساسية كبيرة لأي ارتفاع في مركز الثقل. وتم اختبار حالتين مختلفتين لموضـع مركز الثقل الحالة الأولى عندما BG= 1.8 m والحالة الثانية عندما BG= 0.05 m، وأظهرت النتائج أن قيمة معامل الاستقرار GM في الحالة الأولى كانت سالبة، ما يدل على حالة عدم استقرار واضـحة. وعند تطبيق العلاقة GZ=GM·sin(θ) على زوايا ميل مختلفة (من 0° إلى 30°)، كانت قيم ذراع الاسـتعادة GZ سالبة في الحالة الأولى، وموجبة ولكن صغيرة في الحالة الثانية، مما يدل على تحسن الاستقرار عند خفض مركز الثقل. كما تم تمثيل

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

هذه النتائج في رسم بياني ثنائي أوضح الفارق الكبير بين المنحنيين، حيث أظهر المنحنى المرتبط بـ BG= 1.8 m انحدارًا سريعًا نحو قيم سالبة، في حين حافظ المنحنى الآخر على اتجاه تصاعدي مستقر. وعبر تحليل البيانات باستخدام برنامج SPSS، تم إجراء اختبار معامل الارتباط (Pearson) بين الحالتين، وكانت النتيجة معامل الارتباط= -1.000 ومستوى الدلالة Sig.= 0.000 ما يدل على وجود علاقة عكسية تامة ودالة إحصائيًا بين الحالتين. النتائج الإحصائية تدعم الفرضية الهندسية بأن تعديل موضع مركز الثقل يمثل عاملاً محوريًا في تعزيز استقرار السفن، لا سيما في ناقلات النفط ذات الهيكل الطولي والغاطس العميق.

5. الاستنتاجات

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من تركيزها على تحليل تأثير توزيع الحمولة الطولية والعرضية على استقرار السفن، ولا سيما ناقلات النفط، باستخدام منهجية رياضية تطبيقية قائمة على بيانات فعلية من ناقلة النفط الليبية أنوار أفريقيا، ويُعد هذا التوجه ذا أهمية خاصة في ظل تزايد أحجام السفن، وتعقّد أنماط الشحن، وتطور التصاميم البحرية الحديثة، والتي تتطلب مقاربات تحليلية دقيقة لضمان استقرار السفينة وسلامة تشغيلها، وانفردت كذلك عن الدراسات السابقة في كونها تناولت ناقلة نفط واقعية (أنوار أفريقيا) كنموذج تطبيقي. وأثبتت هذه الدراسة من خلال التحليل الرياضي والتطبيقي أن استقرار السفن يتأثر بشكل مباشر وحاسم بموقع مركز الثقل بالنسبة لمركز الطفو. وقد أظهرت الحسابات المستندة إلى بيانات ناقلة النفط الليبية ANWAAR AFRQYA أن وجود مركز الثقل في مستوى مرتفع يؤدي إلى انخفاض معامل الاستقرار (GM) إلى قيم سالبة، مما يعرض السفينة لخطر الانقلاب حتى عند زوايا ميل صغيرة. من جهة أخرى، تبين أن خفض مركز الثقل يعيد معامل الاستقرار إلى المجال الموجب، ويزيد من قيمة ذراع الاستعادة (GZ)، الأمر الذي يعكس قدرة السفينة على مقاومة الميل واستعادة وضعها العمودي بأمان. وقد دعمت النتائج المستخرجة من برنامج SPSS هذه النتيجة، حيث وُجدت علاقة عكسية تامة بين حالتي BG المرتفع والمنخفض، ما يعزز موثوقية النماذج الرياضية المستخدمة. ومن خلال ما تقدم يتبين أن ضبط وتنظيم توزيع الحمولة داخل السفن يعد عاملا أساسياً لا يمكن إغفاله خصوصا في سفن ناقلات النفط، حيث تمثل توزيع الحمولة أهم العوامل الحاسمة في تحقيق التوازن الطولي والعرضي، الذي ينعكس مباشرة على كفاءة استقرار السفينة وسلامة تشغيلها تحت مختلف الظروف البحرية، كما تُبرز هذه الدراسة أهمية استخدام النمذجة الرياضية كأداة هندسية فعالة في التقييم المسبق لاستقرار السفن في مراحل التصميم والتشغيل.

6. التوصيات

- ضرورة مراقبة مركز الثقل بانتظام، خاصة في السفن ذات الهيكل الطولي العميق مثل ناقلات النفط، إذ يُعد ارتفاعه من أبرز أسباب فقدان الاستقرار الجانبي.
- توزيع الأحمال بشكل هندسي مدروس داخل السفينة، مع التركيز على خفض الحمولة العلوية وزيادة الحمولات السفلية (ballast) عند الحاجة، بهدف تعزيز معامل الاستقرار (GM).
- استخدام نماذج رياضية مبنية على معادلات الاستقرار (GZ وGM) ضمن نظم الملاحة والتحكم، لتوقع سلوك السفينة تحت ظروف ميل محتملة واتخاذ قرارات فورية.
- اعتماد برمجيات المحاكاة مثل Maxsurf أو NAPA أو SPSS في تحليل سيناريوهات الاستقرار الديناميكي خلال التصميم التشغيلي أو إعادة التقييم الفني للسفن العاملة.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

- تنفيذ تدريبات دورية للطاقم البحري على إدارة استقرار السفينة، وتفعيل إجراءات الطوارئ في حال تجاوز زاوية الميل الآمنة، خصوصًا أثناء عمليات التفريغ أو في الموانئ المفتوحة.

المراجع

أولاً: مراجع باللغة العربية

الجبالي، م. ع. (2019). *الاستقرار البحري وتصميم السفن*. الإسكندرية: الأكاديمية العربية للعلوم والتكنولوجيا والنقل البحري.

الحسن، س. ع. (2020). *دليل المهندس البحري: المفاهيم الأساسية في استقرار السفن*. الهيئة المصرية العامة للنقل البحري، القاهرة.

الشيباني، ع. (2015). *مدخل إلى علم بناء السفن وتحليل مراكز القوى*. منشورات جامعة قاريونس، ليبيا.

الفرجاني، إ. (2016). *الهندسة البحرية والاستقرار الطولي والعرضي للسفن*. دار الرواد للنشر البحري، طرابلس.

الناظوري، ح. م. (1990). *اتزان السفن للربابنة وضباط الملاحة*. منشأة المعارف، الإسكندرية.

أبو عيسى، أ. (2014). *أسس توازن السفن في المياه العميقة*. مركز دراسات النقل البحري، بيروت.

ثانياً: مراجع باللغة الإنجليزية

Abankwa, N. O., Bowker, J., Ossont, S. J., Scott, M., & Cox, S. J. (2018). Estimating the longitudinal center of flotation of a vessel in waves using acceleration measurements. *IEEE Sensors Journal*, 18(20), 8334–8340.

Alamsyah, Hijrah, M. F., Setiawan, W., Pawara, M. U., Wulandari, A. I., Suardi, & Habibi. (2025). Static and dynamic stability analysis of liftnet fishing vessel. **In**: *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3032, No. 1, paper No. 070004). AIP Publishing LLC.

Pérez-Canosa, J. M., Orosa, J. A., Galdo, M. I. L., & Barros, J. J. C. (2022). A new theoretical dynamic analysis of ship rolling motion considering navigational parameters, loading conditions and sea state conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, *10*(11), 1646.

Sakuma, S., & Naruse, T. (2015). On the optimization among the ships' breadth, draft and the height of center of gravity. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 22, 229–233.

Schreuder, M., Rosén, A., Themelis, N., Manderbacka, T., Bačkalov, I., Boulougouris, E., Eliopoulou, E., Hashimoto, H., Gonzalez, M. M. (2018). An overview of the current research on stability of ships and ocean vehicles. **In:** *13th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, STAB 2018, Kobe*, *Japan*.

Splash Maritime Training (2023). *Ship stability and ballast systems*. Available online at: [https://www.splashmaritime.com.au/Marops/data/less/Shipk/Stab/Longitudinal.html].