

تحليل استقرار السفن باستخدام معادلات التوازن الطولي والجاني، تطبيق على السفينة الليبية "أنوار أفريقيا"

حمزة مفتاح رجب^{*} بالقاسم محمد الأعوج^{*} عبدالسلام 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, Abdelssalam Ramadhan Daleef

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

Received: 29 June 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، خصوصاً 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. وانطلاقاً 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 المترية (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 والغطاس العميق، كما تؤكد على فاعلية النمذجة الرياضية في دعم القرار الهندسي أثناء التصميم والتشغيل.

الكلمات الدالة: الاستقرار، التوازن الجاني، 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 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)، اللذين 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 لتغيرات دائمة في توزيع الأحمال والسوائل داخل الخزانات (الحسن، 2020).

تسعى هذه الدراسة إلى تطبيق معادلات الاستقرار الطولي والجواني على نموذج حقيقي متمثل في السفينة الليبية أنوار أفريقيا (*ANWAAR AFRQYA*)، وذلك بهدف تقييم أدائها تحت ظروف تشغيل واقعية، وتحليل مدى ملاءمة توازنها عند تغير 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.

1. دراسة جامعة طوكيو للتكنولوجيا البحرية – 2015:

(Sakuma, S., & Naruse, T. (2015)) تناولت 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.

2. دراسة تقدير مركز الطفو الطولي

قام Abankwa وزملاؤه (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.

3. دراسة تحليلية لأبحاث استقرار السفن

في مراجعة علمية شاملة، أجرى Rosén وآخرون (2019) تحليلاً للاتجاهات الحديثة في أبحاث استقرار السفن والمركبات البحرية. وأكدت الدراسة أن دمج المعادلات الطولية والجانبية في التحليل الاستقراري يوفر تمثيلاً أكثر واقعية لأداء السفن، خاصة عند دراسة حالات الانقلاب نتيجة الأحمال غير المتماثلة أو الظروف البحرية القاسية.

4. تحليل ديناميكي لحركة السفينة الطولية والعرضية

تناول Pérez-Canosa وزملاؤه (2022) نموذجاً رياضياً 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)، ما يؤثر بشكل مباشر على التوازن الجانبي.

5. تحليل استقرار سفن الصيد الصغيرة

ركزت Yuliana وآخرون (2024) على تحليل الاستقرار الثابت والديناميكي لسفن الصيد الصغيرة من نوع "liftnet"، حيث تناولت تأثير التوزيع غير المتوازن للوزن على التوازن الطولي والجانبي. وقد أظهرت الدراسة أن هذه السفن حساسة للغاية لأي خلل في توزيع الحمولة، مما يعزز أهمية إدارة الحمولة بدقة في هذا النوع من السفن.

6. دور أنظمة التوازن في تعزيز الاستقرار

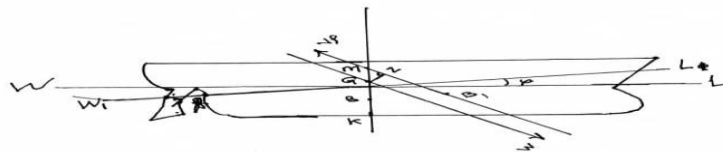
استعرضت وثيقة Splash Maritime (2023) دور أنظمة التوازن (Ballast Systems) في تعزيز الاستقرار الطولي والجانبي للسفن، لا سيما أثناء عمليات التفريغ أو التحميل الجزئي. وقد أكدت الوثيقة أن أنظمة الخزانات الطولية والعرضية تساهم في تقليل آثار ظاهرة السطح الحر، وتدعم الحفاظ على موضع مناسب لمركز الثقل بما يضمن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

2. 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.

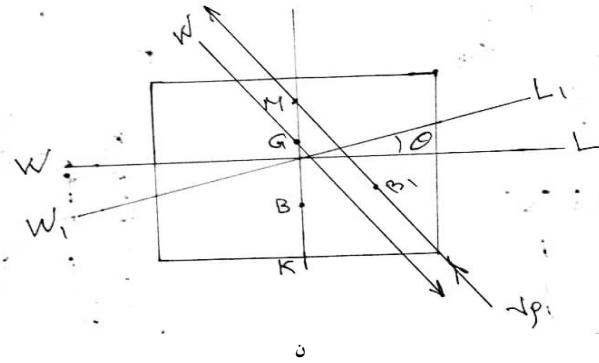
1.2 مفهوم الاستقرار البحري

يشير الاستقرار إلى قدرة وفعالية 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 بين: الاستقرار الطولي: وهو المتعلق بميلان السفينة للأمام والخلف (الناضوري، 1990).



الشكل رقم (1) الميل الطولي للسفينة

الاستقرار الجاني (العرضي): ويصف الميل الجاني للسفينة لليمين أو اليسار.

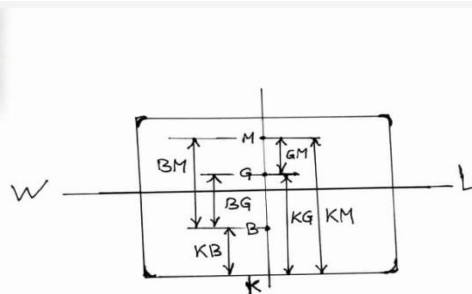


الشكل رقم (2) الميل الجاني للسفينة

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

2.2 أهم التعريفات والمفاهيم الخاصة بدراسة الاستقرار:

- مركز الثقل (G): ، ويمثل 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 منخفضاً، كان الاستقرار أفضل، لأن الفرق الرأسى 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 أيضاً بأنه مركز الدرفة العرضي.
- الارتفاع البيني للمركز المتري (KM) وهو المسافة الرأسية بين قاع السفينة أو ما يسمى بـ (الأرينة) والتي يرمز لها بالحرف (K) والمركز المتري للسفينة (M).
- ارتفاع مركز الطفو (KB) وهي المسافة الرأسية بين قاع السفينة (الأرينة) ومركز طفو السفينة.
- ارتفاع مركز الثقل (KG) وهي المسافة الرأسية ما بين قاع السفينة ومركز ثقل السفينة.
- ارتفاع الميتاسنتر (GM) هو المسافة الرأسية بين مركز الثقل (G) والمركز المتري أو (الميتاسنتر) (M).
- الارتفاع ما بين مركز الطفو والمركز المتري للسفينة (BM) وهو يعرف بنصف قطر الميتاسنتر



الشكل (3) أهم الارتفاعات والمسافات الرأسية لاستقرار السفينة

3.2 معاملات ومعادلات استقرار السفينة

وهي المعادلات التي يحسب بواسطتها استقرار السفينة، فإذا كان ارتفاع الميتاسنتر (GM) هو مقياس اتزان السفينة، وأن الارتفاع البيئي للميتاسنتر (KM) يمكن حسابه رياضياً إذ أنها حاصل جمع المسافتين (KB) و (BM). وكل منهما يمكن حسابهما عند غاطس معين، أما المسافة (KG) فيمكن إيجادها عملياً بواسطة تجربة الميل عند الإزاحة الخفيفة للسفينة، أما المسافة (KG) عند أي حالة شحن فيمكن إيجادها بأخذ العزوم للازاحة الخفيفة والشحنات حول الأينة (الناضوري، 1990).
ومما تقدم يتضح بأن ارتفاع المركز المتري (الميتاسنتر) يحسب عند أي حالة شحن بمعرفة كل من (KM) و (KG)، وجميعها تُحسب كالتالي:

$$\begin{aligned} KM &= KB + BM & \dots\dots\dots (1) \\ KG &= KM - GM & \dots\dots\dots (2) \\ GM &= KM - KG & \dots\dots\dots (3) \\ GM &= BM - BG & \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

- **BM:** هو المسافة الرأسية بين المركز المتري (M)، ومركز الطفو (B) ويعرف بالارتفاع الميتاسنتر، وهو يعرف بنصف قطر الطفو العرضي،
- ويُحسب بواسطة:

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

حيث:

- I: عزم القصور العرضي لسطح الماء
- V: حجم الجزء المغمور من السفينة
- **BG:** المسافة بين مركز الطفو ومركز الثقل.
- قيمة GM تمثل أحد أهم مؤشرات الاستقرار، حيث:
- إذا كانت موجبة → السفينة مستقرة.
- إذا كانت صفراً → السفينة في حالة توازن محايد.
- إذا كانت سالبة → السفينة غير مستقرة.

4.2 ذراع الاستعادة (GZ)

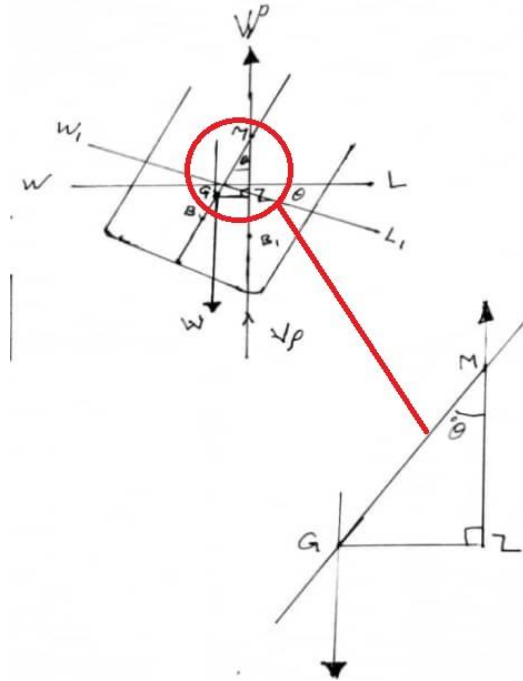
يُعرف GZ بأنه المسافة الأفقية بين مركز الثقل وخط الطفو الجديد عند ميل السفينة، ويُحسب بالمعادلة:

$$GZ = GM \times \sin \theta \dots\dots\dots (6)$$

حيث:

θ : زاوية الميل (بدرجة أو راديان)

كلما زادت قيمة GZ، زادت قدرة السفينة على العودة إلى وضعها المستقيم.



الشكل (4) الرسم التوضيحي لحساب ذراع الاستعداد

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).

6.2 العوامل المؤثرة على الاستقرار

- ارتفاع مركز الثقل نتيجة الأحمال المرتفعة.
- ضيق عرض السفينة مقارنة بطولها.
- غياب أنظمة الاتزان الديناميكي (Ballast).
- تغيير 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 تُمكن من التنبؤ بسلوك السفينة في حالات الميل المختلفة. وتمثل هذه النماذج الأساس في تحليل الأداء البحري سواء في التصميم أو التشغيل (الفرجاني، 2016).

1. نموذج ذراع الاستعادة (Righting Arm Model)

يُعد من أبسط وأكثر النماذج استخدامًا، ويقوم على معادلة السابقة رقم (3).

ويُستخدم هذا النموذج لتقدير ذراع الاستعادة عند زوايا ميل صغيرة إلى متوسطة (عادةً حتى 30°). ويمكن من خلاله رسم منحنى GZ مقابل θ لمعرفة زاوية الميل القصوى الآمنة قبل حدوث انقلاب.

2. نموذج منحنى الاستقرار الديناميكي (Dynamic Stability Curve)

يركّز على التكامل العددي لقيم GZ عبر مدى زوايا الميل، للحصول على مؤشر الاستقرار الديناميكي:

$$GZ(\theta)d\theta \int_{1\theta}^{2\theta} = \text{Area under GZ curve} \quad \dots\dots\dots (7)$$

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

3. 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. نموذج الحالة الحدية (Limit State Model)

يركّز 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. 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 و GM، خاصة عند اختبار سيناريوهات متعددة.

2. المنهجية

اعتمدت هذه الدراسة على المنهج التحليلي النظري، الذي يقوم على استخدام النمذجة الرياضية لتفسير استقرار السفينة عند تغير ظروف التشغيل 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. منهج التحليل الهندسي الرياضي:

تضمنت هذه المرحلة حساب المؤشرات التالية:

- **حجم الجزء المغمور للسفينة (V):** تم تقديره باستخدام العلاقة التقريبية التي تربط الطول والعرض والغطاس بمعامل الامتلاء الهندسي (Block Coefficient)، المناسب لنقلات 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 حسابه وفق المعادلة السابقة رقم (3) ، حيث تم افتراض عدة قيم لموضع مركز الثقل BG لتمثيل سيناريوهات مختلفة.
- ذراع الاستعادة (GZ): حُسب باستخدام المعادلة السابقة رقم (6) لمجموعة من زوايا الميل من 0° إلى 30° .
- 2. 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 الجانبى.
- الحالة الثانية: تم خفض مركز الثقل تدريجيًا لمحاكاة تأثير إعادة توزيع الحمولة أو تحسين تصميم التوازن، مع متابعة تغير قيم GZ ومقارنتها.
- 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. معايير التقييم:
استُخدمت قيمة GM كمؤشر أولي لتحديد نوع الاستقرار (موجب: مستقر، صفر: توازن محايد، سالب: غير مستقر).
تم تحليل قيمة GZ عند زوايا الميل المختلفة للحكم على مدى قدرة السفينة على استعادة توازنها.
تم تحديد زاوية فقدان الاستقرار عند النقطة التي تصبح فيها $GZ=0$.

3. الجانب التطبيقي

يركز هذا الفصل على تطبيق المعادلات النظرية لاستقرار السفن على حالة واقعية، وهي ناقلة المنتجات النفطية الليبية (ANWAAR AFRQYA)، وذلك لتحليل مدى استقرارها الجانبى عند تغير زاوية الميل، وتحت فرضيات مختلفة لموضع مركز الثقل.

1. البيانات الفنية للسفينة المدروسة:

جدول 1. بيانات السفينة الليبية أنوار افريقيا

الخاصية	القيمة	الوحدة
الطول الكلي (LOA)	171.2	متر
العرض (Beam)	27.4	متر
الغاطس (Draught)	11.8	متر
الحمولة الوزنية (DWT)	34656	طن
معامل الامتلاء التقريبي (Cb)	0.83	--

2. حساب حجم الجزء المغمور (V):

$$V = L \times B \times T \times C_b \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$V = 171.2 \times 27.4 \times 11.8 \times 0.83 = 45942.48m^3$$

3. حساب عزم القصور العرضي للمقطع (I):

$$I = \frac{D \times B^3}{12} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$I = \frac{27.4 \times 11.8^3}{12} = 3751.59m^3$$

4. حساب نصف قطر الطفو (BM):

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

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

5. دراسة موضع مركز الثقل (BG)

المعطيات الأساسية:

جدول 2. المعطيات الأساسية

الرمز	القيمة	الوحدة
BM	0.082	متر
زاويا الميل المدروسة θ	$15^0, 10^0, 0^0$ $30^0, 20^0$	درجة

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

$$GM = BM - BG$$

$$GM = 0.082 - 1.8 = -1.718m$$

$$GZ = GM \times \sin \theta$$

جدول 3.

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

النتيجة: السفينة غير مستقرة في هذا السيناريو، لأن GM اصغر من 0 و GZ اصغر من 0 عند كل الزوايا.

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

$$GM = BM - BG$$

$$GM = 0.082 - 0.05 = 0.032m$$

$$GZ = GM \times \sin \theta$$

جدول 4.

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

النتيجة: السفينة مستقرة في هذا السيناريو، لأن GM أكبر من 0 و GZ أكبر من 0 عند كل الزوايا.

2.3 التحليل في SPSS :

دراسة العلاقة بين زاوية الميل وذراع الاستعادة GZ في حالتين مختلفتين لموضع مركز الثقل:

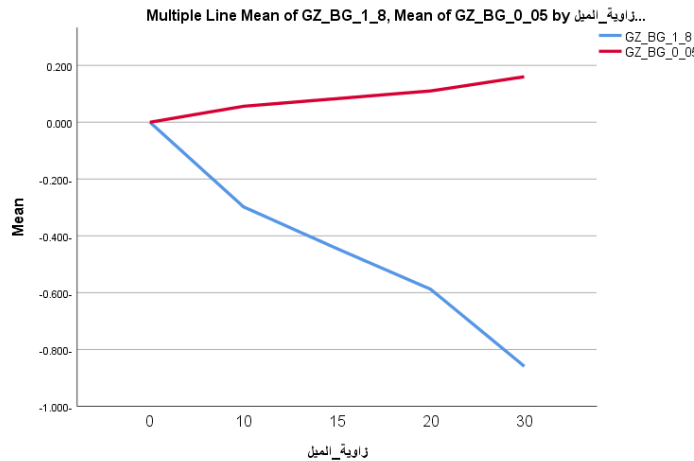
- BG = 1.8 m (حالة غير مستقرة)
- BG = 0.05 m (حالة مستقرة)

أولاً: الرسم البياني الخطي المقارن

الشكل 1 يوضح رسمًا بيانيًا خطيًا تغير ذراع الاستعادة GZ بالنسبة لزاوية الميل في حالتين:

الخط الأزرق (GZ_BG_1_8): يمثل حالة مركز ثقل مرتفع → تتجه القيم نحو السالب مع زيادة الزاوية، مما يعكس حالة عدم استقرار.

الخط الأحمر (GZ_BG_0_05): يمثل حالة مركز ثقل منخفض → القيم تبقى موجبة وتزداد تدريجيًا، مما يدل على استقرار تدريجي وآمن، ونستنتج وجود اختلاف كبير في سلوك GZ بين الحالتين، ويظهر الرسم أن خفض مركز الثقل يحسن قدرة السفينة على مقاومة الميل.



شكل (5). الرسم البياني الخطي تغير ذراع الاستعادة GZ بالنسبة لزاوية الميل

ثانيًا: معامل الارتباط (Correlation Matrix)

الشكل 2 يعرض تحليل معامل الارتباط (Pearson Correlation) بين:

GZ_BG_0_05 و GZ_BG_1_8

● النتائج:

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).

تحليل SPSS الشكل رقم (6)

● التحليل:

معامل الارتباط = -1.000 → علاقة عكسية تامة بين GZ في الحالتين.
الدلالة الإحصائية → Sig. = 0.000 الفرق معنوي جداً عند مستوى 0.01 (أي هناك علاقة موثوقة إحصائياً).

4. النتائج والمناقشة

1. أظهرت الحسابات النظرية المستندة إلى معادلات الاستقرار البحري أن قيمة نصف قطر الطفو (BM) لناقلة ANWAAR AFRQYA تبلغ حوالي 0.082 متر، وهي قيمة منخفضة نسبياً مقارنة بطول السفينة وعرضها، مما يشير إلى حساسية كبيرة لأي ارتفاع في مركز الثقل.
2. تم اختبار حالتين مختلفتين لموضع مركز الثقل:

الحالة الأولى: BG = 1.8m

الحالة الثانية: BG = 0.05m

وأظهرت النتائج أن قيمة معامل الاستقرار GM في الحالة الأولى كانت سالبة، ما يدل على حالة عدم استقرار واضحة.
3. عند تطبيق العلاقة $GZ = GM \cdot \sin(\theta)$ على زوايا ميل مختلفة (من 0° إلى 30°)، كانت قيم ذراع الاستعادة GZ سالبة في الحالة الأولى، وموجبة ولكن صغيرة في الحالة الثانية، مما يدل على تحسن الاستقرار عند خفض مركز الثقل.
4. تم تمثيل هذه النتائج في رسم بياني ثنائي أوضح الفارق الكبير بين المنحنيين، حيث أظهر المنحنى المرتبط بـ BG = 1.8m انحداراً سريعاً نحو قيم سالبة، في حين حافظ المنحنى الآخر على اتجاه تصاعدي مستقر.

5. عبر تحليل البيانات باستخدام برنامج SPSS، تم إجراء اختبار معامل الارتباط (Pearson) بين الحالتين، وكانت النتيجة:

معامل الارتباط = -1.000

مستوى الدلالة Sig. = 0.000

ما يدل على وجود علاقة عكسية تامة ودالة إحصائياً بين الحالتين.

6. النتائج الإحصائية تدعم الفرضية الهندسية بأن تعديل موضع مركز الثقل يمثل عاملاً محورياً 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، وتعدد 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.

وأثبت هذا البحث 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 حالي BG المرتفع والمنخفض، ما يعزز موثوقية النماذج الرياضية المستخدمة.

من خلال ما تقدم يتبين أن ضبط وتنظيم توزيع الحمولة داخل السفن يعد عاملاً أساسياً لا يمكن أغفاله خصوصاً 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 يُبرز هذا البحث أهمية استخدام النمذجة الرياضية كأداة هندسية فعالة في التقييم المسبق لاستقرار السفن في مراحل التصميم والتشغيل.

6. التوصيات

1. ضرورة مراقبة مركز الثقل بانتظام، خاصة في السفن ذات الهيكل الطولي العميق مثل ناقلات النفط، إذ يُعد ارتفاعه من أبرز أسباب فقدان الاستقرار الجاني.
2. توزيع الأحمال بشكل هندسي مدروس داخل السفينة، مع التركيز على خفض الحمولة العلوية وزيادة الحمولات السفلية (ballast) عند الحاجة، بهدف تعزيز معامل الاستقرار (GM).
3. استخدام نماذج رياضية مبنية على معادلات الاستقرار (GM و GZ) ضمن نظم الملاحة والتحكم، لتوقع سلوك السفينة تحت ظروف ميل محتملة واتخاذ قرارات فورية.
4. اعتماد برمجيات المحاكاة مثل Maxsurf أو NAPA أو SPSS في تحليل سيناريوهات الاستقرار الديناميكي خلال التصميم التشغيلي أو إعادة التقييم الفني للسفن العاملة.
5. تنفيذ تدريبات دورية للطواقم البحري على إدارة استقرار السفينة، وتفعيل إجراءات الطوارئ في حال تجاوز زاوية الميل الآمنة، خصوصاً أثناء عمليات التفريغ أو في الموانئ المفتوحة.

المراجع:

قائمة المراجع 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*. القاهرة: الهيئة المصرية العامة للنقل البحري.
- الشيباني، ع. (2015). *مدخل إلى علم بناء السفن وتحليل مراكز القوى*. طرابلس: منشورات جامعة قارونس.
- الفرغاني، إ. (2016). *الهندسة البحرية والاستقرار الطولي والعرضي للسفن*. طرابلس: دار الرواد للنشر البحري.
- الناطوري، ح. م. (1990). *اتزان السفن للربانة وضباط الملاحة*. الإسكندرية: منشأة المعارف.
- أبو عيسى، أ. (2014). *أسس توازن السفن في المياه العميقة*. بيروت: مركز دراسات النقل البحري.

قائمة المراجع الأجنبية:

- 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(0), 229–233. <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.22.229>.
- 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. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2865463>
- Rosén, A., Ruponen, P., Shigunov, V., Schreuder, M., & Terada, D. (2019). An overview of the current research on stability of ships and ocean vehicles. *Ocean Engineering*, 186, 106134. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106134>
- 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. <https://doi.org/10.3390/jmse10111646>
- Yuliana, N., Hidayat, R., & Syamsuri, S. (2024). Static and dynamic stability analysis of liftnet fishing vessel. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 8(1), 1–9. <https://www.researchgate.net/publication/391873799>
- Splash Maritime Training. (2023). Ship stability and ballast systems. Retrieved from <https://www.splashmaritime.com.au/Marops/data/less/Shipk/Stab/Longitudinal.htm> .
- Biran, A. (2003). *Ship hydrostatics and stability*. Butterworth-Heinemann.
- Lewis, E. V. (Ed.). (1989). *Principles of naval architecture*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Muckle, W. (2017). *Naval architecture for marine engineers*. Institute of Marine Engineering, Science and Technology.
- Papanikolaou, A. (2014). *Ship design: Methodologies of preliminary design*. Springer.
- Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). *Basic ship theory* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.