

## بروتوكول التحديد التجريبي لمركز ثقل السفن وأهميته في عالم اتزان السفن

الدكتور رامي حوا\*

الدكتور ميشيل بريهان\*\*

(تاريخ الإيداع 8 / 5 / 2007. قُبل للنشر في 19/7/2007)

### □ الملخص □

إن كارثة غرق العبارة المصرية السلام 98 التي فقدت اتزانها بسرعة وغرقت بهذا الشكل المأساوي الكبير، دعا المهتمين بالسلامة البحرية إلى تحليل هذه الحادثة وعزا بعضهم ذلك إلى الطوابق التي تم إضافتها إلى البنية الإنشائية الرئيسية للسفينة بدون الحساب الدقيق لمركز التوازن. يعتبر التحديد الدقيق لموضع ومركز ثقل السفينة  $G$  ضرورياً لتحديد ارتفاع الميتاسنتر وإنشاء منحنى أذرع عزوم الاستبدال بصورة صحيحة، حيث إن هذا التحديد قد يؤدي إلى تفادي نتائج كارثية يمكن أن تحدث عند جراء التحديد الخاطئ أو غير الدقيق لمركز النقل. إن تحديد موقع مركز النقل لسفينة فارغة ولكن بوجود جميع التجهيزات الأساسية باستخدام الطرق الحسابية يعتبر من القضايا المعقدة. لذا فإن أفضل طريقة للحساب بعد الانتهاء من تجميع التجهيزات الأساسية هي الطريقة التجريبية التي تدعى تجربة الميل. هذا البحث يتطرق إلى صياغة ترتيب هذه الطريقة بتفاصيله الدقيقة وفقاً لبروتوكول غير موجود في أي من المراجع الهندسية البحرية حيث تعتبر هذه الدراسات سرية وخاصة بمراكز الأبحاث و ترسانات بناء السفن لما لها من قيمة علمية و مردود مادي.

كلمات مفتاحية: اتزان - ميل - تجربة - سفن.

\* أستاذ مساعد في قسم الهندسة البحرية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.  
\*\* أستاذ مساعد في قسم الهندسة البحرية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

## Protocol of Experimental Determination of the Centre of Gravity of Vessel and Its significance in Vessel Stability

Dr. Rami Hawa\*  
Dr. Michel Barbhan\*\*

(Received 8 / 5 / 2007. Accepted 19/7/2007)

### □ ABSTRACT □

The catastrophic capsizing of Egyptian M/V ALSALAM 98 when it lost its stability pushed the marine experts to analyze this catastrophe. Some of them thought that one of the major causes was the bad measurements of new centre of gravity after a new structure was added to the accommodation of the vessel. Accurate spotting for vessel centre of gravity  $G$  is necessary for the determination of Metacentre high and establish correct curve for moment arms. This prevents catastrophic results that can happen when the centre of gravity is incorrectly established. It is a complex duty to establish the centre of gravity for empty vessel employing calculation methods. Therefore, the final position for empty vessel centre of gravity is established following experimental method called (rake experiment).

This study discusses the aspect of arranging these methods with all their details according to a Protocol which is not available in any marine engineering references. This study is classified as a confidential specific to centre of research and shipyards due to its high scientific value, besides having found materialistic output.

**Key Words:** Stability, Experiment, Ship.

---

\*Associate Professor, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*Associate Professor, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Faculty, Tishreen University, Lattakia, Syria.

## مقدمة:

يعتبر التحديد الدقيق لموضع ثقل السفينة  $G$  ومركزها ضرورياً لتحديد ارتفاع الميئاسنتر ولإنشاء منحني أذرع عزوم الاستبدال بصورة صحيحة، حيث إن هذا التحديد قد يؤدي إلى تقادي نتائج كارثية يمكن أن تحدث عند التحديد الخاطئ أو غير الدقيق لمركز الثقل.

وتعتبر الطرق التجريبية التي تعتمد على أحواض بناء السفن عند بنائها لسفينة ما أو لمجموعات متناظرة من السفن وفقاً لتراتب معين هي الطرق الدقيقة حيث تأخذ بعين الاعتبار كل المتغيرات والقيم المطلوبة. لكن هذه الطرق يتم اعتمادها بتراتبية خاصة وفقاً للحوض الذي يتم البناء به لكن دون نشر أو تعميم تفاصيل إنما إعطاء النتائج فقط.

إن صياغة ترتيب هذه الطرق بتفاصيلها الدقيقة وفقاً لبروتوكول يؤدي إلى حسابات دقيقة غير موجود في أي من المراجع الهندسية البحرية، حيث تعتبر هذه الدراسات سرية وخاصة بمراكز الأبحاث و ترسانات بناء السفن لما لها من قيمة علمية ومردود مادي.

## أهمية البحث وأهدافه:

أهمية هذا البحث تكمن في إيجاد بروتوكول تجريبي لتحديد البارامترات الرئيسية لاتزان أية وحدة عائمة بمختلف الأوزان والأنواع والحجوم. هذا البروتوكول تعتبره ترسانات بناء السفن ومراكز الأبحاث من الوثائق التي لا تعتم مع وثائق السفينة مثل كراس الاتزان STABILITY BOOKLET وكراس اتزان للبضائع الصب GRAIN BOOKLET وجميع الكراسات التي تنص عليها اتفاقية سلامة الأرواح في البحار وتعديلاتها SOLAS. إن تزويد السفن بنتائج الحسابات فقط يجعل من الصعب جداً إجراء أي تطوير أو تعديل جوهري دقيق وخالي من الأخطاء والأخطار على بنية سفينة ما والتي قد يضطر إليها المالك أحياناً (مثال تحويل سفينة بضائع عامة إلى سفينة نقل مواشي).

ونظراً لأن القطر العربي السوري حالياً في طور تطوير قطاع النقل البحري وتجري حالياً فكرة جديفة لإنشاء أحواض لبناء وترميم السفن فإن وجود هذا البروتوكول بيد المصممين والباحثين يساعد في التمكن من الحسابات الدقيقة والأمانة حيث تطبق المقولة السائدة في البحر السلامة أولاً SAFETY FIRST.

### 1- التحديد التجريبي لموقع مركز ثقل السفينة:

يعتبر التحديد الدقيق لموضع ثقل السفينة  $G$  ومركزها ضرورياً لتحديد ارتفاع الميئاسنتر ولإنشاء منحني أذرع عزوم الاستبدال بصورة صحيحة.

إن تحديد موقع مركز ثقل السفينة الفارغة مع وجود جميع التجهيزات الأساسية باستخدام الطرق الحسابية يعتبر من القضايا المعقدة ويقود إلى نتائج مثقلة بالأخطاء الكثيرة [1]، نظراً للعدد الكبير للأجزاء المكونة لهذه المنشأة المعقدة، والتي لا يمكن تحديد أوزانها ومراكز ثقلها وعزومها بصورة دقيقة. لهذا السبب يحدد الموضع النهائي لمركز ثقل السفينة الفارغة بعد الانتهاء من تجميع تجهيزاتها الأساسية باستخدام طريقة تجريبية تدعى تجربة الميل. في حالات معينة تستخدم هذه الطريقة لمراقبة ارتفاع الميئاسنتر للسفينة أثناء استثمارها.

يتم إجراء تجربة الميل عادةً في ترسانة بناء السفن أو إصلاحها بوجود ممثل عن هيئة التصنيف [2]. تُنظم عادةً النتائج التي يتم الحصول عليها بشكل وثيقة رسمية خاصة بالسفينة المختبرة.

### 1-1 الأسس النظرية لتجربة الميل:

تعتمد هذه التجربة على إمالة السفينة عرضياً عن طريق أحمال معدة لهذا الغرض بشكل متعامد مع مستوى التناظر، ومن ثم قياس زاوية الميلان العرضي الحاصلة.

سنفترض أنه قد تم وضع حملين متوسطين على جانبي سفينة طافية بدون ميلان عرضي، وزن كل واحد منهما  $p$  على مسافات متساوية  $y$  من مستوى التناظر، بحيث تبقى السفينة طافية بدون أي ميلان عرضي.

عند نقل أحد هذه الأحمال  $p$  عرضياً على سطح السفينة لمسافة قدرها  $y$ ، فإن ذلك يسبب ميلاناً عرضياً للسفينة بزاوية  $\phi$ ، كما في الشكل (1-1).

نتيجة انتقال الحمل  $p$  على سطح السفينة فإن مركز ثقل السفينة ينتقل عرضياً بمقدار:

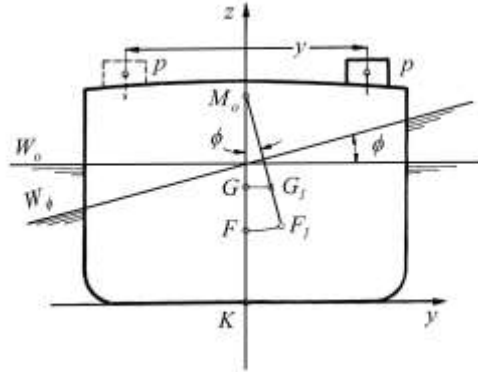
$$\overline{GG_1} = \frac{P \cdot y}{P}$$

حيث إن:

$p$ - وزن الحمل المنقول عرضياً.

$y$ -الانتقال العرضي الحاصل.

$P$ - وزن السفينة المتضمن وزن الأحمال المستخدمة.



الشكل (1-1)

يترافق ذلك بانتقال مركز الطفو  $F$  إلى الموضع  $F_1$ ، وهنا تأخذ السفينة وضعية توازن جديدة، بحيث تصبح النقطتان  $F_1$  و  $G_1$  واقعتين على خط شاقولي واحد متعامد مع خط الماء الجديد  $W_\phi$ .

$$h_o = \frac{\overline{GG_1}}{\text{tg}\phi} \quad \text{من المثلث } M_o G G_1 \text{ نجد أن ارتفاع الميئاسنتر يعطى بالعلاقة}$$

$$(1-1) \quad h_o = \frac{P \cdot y}{P \cdot \text{tg}\phi} \quad \text{بتعويض قيمة } \overline{GG_1} \text{ من العلاقة نجد أن:}$$

لتحديد موضع مركز ثقل السفينة بعد تجهيزها بصورة نهائية، ينبغي تعديل نتائج التجربة بحيث نأخذ بعين الاعتبار انتقال مركز الثقل نتيجة إزالة الأوزان المستخدمة للإمالة أثناء التجربة والأوزان غير الضرورية المتواجدة في السفينة أثناء التجربة، أيضاً نتيجة إضافة بعض التجهيزات الناقصة بعد إجراء التجربة [3-4].

لإجراء تجربة الميل أثناء استثمار السفن تُركب وبصورة متناظرة خزانات جانبية ذات ساعات موحدة. يتم إجراء التجربة بضحٍ متتالي للمياه من أحد الخزانات إلى خزان يقع على الجانب المعاكس. ولتجنب تأثير السطح الحر للماء في الخزانات يتم ملء هذه الخزانات بالكامل [5]. لا تستخدم هذه الطريقة عادةً في ترسانات أو أحواض بناء السفن نظراً لانخفاض دقة النتائج، ولكن لسهولة إجرائها فهي تستخدم أثناء استثمار السفن من أجل تحديد ارتفاع الميناسنتر للسفينة المحملة قبل إبحارها.

## 2-1 المراحل العملية المتبعة لإجراء تجربة الميل:

### 1-2-1 تحضير السفينة لإجراء تجربة الميل:

إن دقة نتائج تجربة الميل تتعلق بشكلٍ أساسي بالتحضير الجيد للسفينة قبل إجراء تجربة الميل. لهذا السبب ينبغي الأخذ بعين الاعتبار النقاط الهامة التالية:

- (1) ينبغي إجراء التجربة في يوم غير ريحي [6] أو عندما تكون سرعة الرياح أقل من  $3^0$  وفقاً لمقياس بوفورت (*Beaufort*)، وفي مياه ساكنة تماماً دون وجود أية تيارات مائية.
- (2) ينبغي أن تكون السفينة مجهزة بصورة شبه تامة بدون وجود حمولات زائدة قدر الإمكان.
- (3) ينبغي أن تكون السفينة طافية بصورة حرة، بحيث تكون حبال الربط محررة، السلم الخارجي مرفوعاً والسفينة بعيدة بصورة كافية عن الشاطئ.
- (4) ينبغي أن تكون الخزانات فارغة أو مملوءة بالكامل لمنع تشكل سطوح حرة، وعند وجود ضرورة إبقاء بعض الخزانات مملوءة جزئياً ينبغي الأخذ بعين الاعتبار تأثير السطوح الحرة في الحسابات النهائية.
- (5) جميع العناصر أو الأجزاء المتحركة مثل أذرع الروافع، قوارب النجاة على المطراح إضافةً للعناصر المتدرجة ينبغي تثبيتها بإحكام قبل إجراء التجربة.
- (6) ينبغي أن يتواجد في السفينة فقط الأشخاص القائمون على إجراء تجربة الميل.
- (7) ينبغي أن تكون السفينة طافية بدون أي درفلة طولية قدر الإمكان، وأيضاً ينبغي ألا تتجاوز زاوية الميلان العرضي إن وجدت  $(0,5^0 \div 1^0)$ .
- (8) ينبغي أن تكون مراجل مولدات البخار مملوءةً بالمياه حتى مستوى عملها الطبيعي. وفي هذه الحالة عموماً لا يؤخذ بعين الاعتبار أي تصحيح يتعلق بظهور سطوح حرة في هذه المراجل. في حال كانت هذه المراجل فارغة ينبغي تسجيل وزن المياه غير الموجودة في سجل الحمولات الناقصة لأخذها بعين الاعتبار عند إجراء الحسابات النهائية.
- (9) قبل إجراء التجربة، نادراً ما تكون السفينة مجهزة بصورة تامة. عادةً لا يتواجد بعض من تجهيزاتها مثل زوارق النجاة، المراجل، جنازير الربط، وجزء كبير من المواد المخزنة. من جهة أخرى قد تتواجد حمولات زائدة غير ضرورية بالإضافة إلى الحمولات اللازمة لإجراء التجربة. لهذا السبب ينبغي قبل إجراء التجربة تنظيم جدول خاص بالتجهيزات الناقصة وجدول آخر خاص بالحمولات الزائدة والحمولات اللازمة لإجراء تجربة الميل. هذه الجداول تتضمن وزن هذه الحمولات وإحداثيات مركز ثقلها.
- (10) يتم عادةً استخدام كتل أو قضبان معدنية أو أكياس من الرمل كحمولات لازمة لإجراء تجربة الميل يتم نقلها بعربات خاصة أثناء إجراء التجربة.

هذه الحمولات ينبغي قدر الإمكان تحديد أوزانها بدقة باستخدام الموازين، وعادةً الوزن الإجمالي لهذه الحمولات ينبغي أن يساوي:

$(0,5 \div 1) \%$  من وزن السفينة في حالة السفن الصغيرة.

$(0,2 \div 0,5) \%$  من وزن السفينة في حالة السفن الكبيرة.

ويمكن تحديد هذه الحمولات بدقة وفقاً للعلاقة التالية:

$$\sum p_i = \frac{P \cdot h_o \cdot \text{tg} \phi}{y} \quad (1-2)$$

حيث إن:

$\sum p_i$  - الوزن الإجمالي للحمولات اللازمة لإجراء تجربة الميل.

$h_o$  - ارتفاع الميتاسنتر المحدد كقيمة اختيارية.

$\phi$  - زاوية الميلان العرضي المحددة كقيمة اختيارية ضمن المجال من  $1^\circ$  إلى  $4^\circ$ .

توضع هذه الحمولات على السطح العلوي للسفينة بعد تقسيمها إلى أربع مجموعات (ست مجموعات في حالة السفن الحربية) بشكل متناظر بالنسبة إلى مستوي تناظر السفينة، بحيث تتوضع على كل جانب من جوانب السفينة مجموعتان من المجموعات الأربعة [7-8] كما هو مبين في الشكل (1-2). هذا التوزع ينبغي أن يؤمن عدم حدوث أي ميلان طولي أو عرضي للسفينة قبل الاختبار.

رقم المرحلة	توضع حمولات التجربة الميل
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

الشكل (1-2)

تُقاس المسافة  $y$  بين الخطوط المارة بمراكز ثقل مجموعات الأوزان (الأحمال) المتوضعة على جانبي السفينة إضافة إلى بعد مراكز ثقلها عن السطح بدقة تصل حتى  $0,5\%$ .

عزم الميلان العرضي الإجمالي أو المحصل في أي مرحلة من مراحل إجراء التجربة يساوي المجموع الجبري لعزوم الميلانات العرضية الناتجة عن انتقال مجموعات الأحمال حتى المرحلة المعينة. يمكن أيضاً تحديد هذا العزم باستخدام العلاقة التالية شرط أن يكون للمجموعات الأربعة وزن واحد:

$$M_i = (p_{p_i} - p_{\ell_i}) \cdot \frac{y}{2} \quad (1-3)$$

حيث إن:

$p_{p_i}$  - وزن مجموعات الأحمال المتواجدة على الجانب الأيمن في المرحلة المعينة (المدروسة).

$p_{\ell_i}$  - وزن مجموعات الأحمال المتواجدة على الجانب الأيسر في المرحلة المعينة (المدروسة).

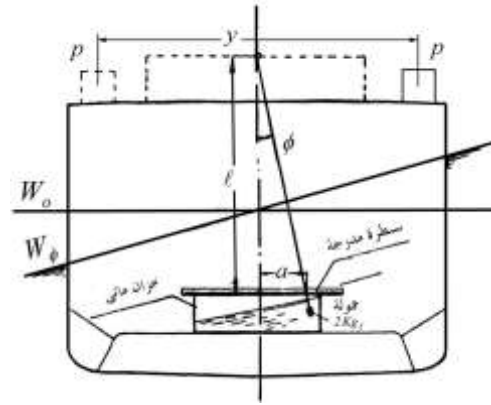
$y$  - الانتقال العرضي الحاصل كقيمة مطلقة (بدون إشارة).

يُحسب عزم الميلان العرضي الناتج عن انتقال كل مجموعة على حدة وعزم الميلان العرضي الإجمالي لكل مرحلة من مراحل تجربة الميل وفقاً للمخطط المبين في المثال القادم.

يتم انتقال مجموعات الأحمال أثناء تجربة الميل وفق التسلسل المبين في الشكل (1-2). من هذا الشكل يُلاحظ وجود تسع مراحل لتجربة الميل، في ثلاثٍ منها وهي المرحلة الأولى والخامسة والتاسعة يكون توزيع الأحمال منتظماً أو متناظراً بالنسبة لمستوي تناظر السفينة.

### 1-2-2 النواسات وتحديد زوايا الميلان العرضي:

تُحدد زوايا الميلان العرضي باستخدام النواسات أو الأواني المستطرفة. ويتم قياس زوايا الميلان العرضي عادةً باستخدام نواسين أو ثلاثة توضع عند مقدمة ووسط ومؤخرة السفينة. تُعلق النواسات شاقولياً في مستوي تناظر السفينة عند فتحات عنابر السفينة وعند فتحات في سطح السفينة [9].



الشكل (1-3)

من جهة أخرى ينبغي تجنب وضع هذه النواسات عند المنشآت العلوية للسفينة نظراً لتأثر أدائها بشكل سيء بفعل الرياح. يتراوح طول النواسات المستخدمة من  $m (6 \div 10)$  في حالة السفن الكبيرة، ومن  $m (2 \div 6)$  في حالة السفن الصغيرة.

تُعلق أُنقال النواسات بحبال قوية سماكتها  $mm (2 \div 0,5)$  أو بواسطة أسلاك معدنية سماكتها حوالي  $0,25 mm$ . يُزوّد ثقل كل نواس بتصالب مؤلف من صفيحتين متعامدتين، ويغمر هذا الثقل مع التصالب المتصل

به في خزان مملوء بالماء أو الزيت لتأمين التخמיד السريع لتأرجح النواس أثناء الميلان العرضي للسفينة. الشكل (3-1).

تُثبت على الخزان لوحة مجهزة بتدريج ميليمتري لقياس انحرافات النواس أثناء الميلان العرضي للسفينة. يتم وضع الخزان مع اللوحة بحيث يستطيع النواس التأرجح بحرية مع ميلان السفينة عرضياً. عند بدء التجربة يُحدد الموضع الصفري للنواس المقابل لحالة التوزع المنتظم لمجموعات الأحمال على سطح السفينة.

في حال تأرجح النواس قبل نقل أي مجموعة من الأحمال فإن الموضع الصفري يتم تحديده بقراءة عدد زوجي من الانحرافات المتتالية في كل من الاتجاهين (ثمانية أو عشرة انحرافات متتالية على الأغلب)، ثم تُحسب القيمة الوسطية لهذه الانحرافات والتي تسمى القيمة الوسطية لمؤشر النواس في الموضع الصفري. يظهر هذا الموضوع عادةً في المراحل (1-5-9) نظراً للتوزع المتناظر لمجموعات الأحمال.

تُحدد بعد ذلك القيمة الوسطية للانحرافات المتتالية الحاصلة في كل مرحلة من مراحل تجربة الميل. ثم يُحدد الإنحراف الوسطي للنواس  $a_i$  عن الموضع الصفري في كل مرحلة من مراحل التجربة على النحو التالي:

$$a_i = x_i - \frac{1}{3} \cdot (x_1 + x_5 + x_9) \quad (1-4)$$

حيث إن:

$x_i$  - القيمة الوسطية للانحرافات المتتالية (لمؤشر النواس) في أي مرحلة.  
 $x_1, x_5, x_9$  - القيمة الوسطية لمؤشر النواس في المراحل (1-5-9) المقابلة للموضع الصفري.

بعد تحديد الانحراف الوسطي للنواس  $a_i$  عن الموضع الصفري في كل مرحلة من مراحل التجربة يمكن تحديد

$$\text{ظل زاوية الميلان العرضي الحاصلة وفقاً للعلاقة: } \text{tg } \phi = \frac{a_i}{l}$$

حيث إن:

$l$  - طول النواس اعتباراً من نقطة التعليق وحتى الحافة العليا للوحة التدرج الميليمتري.  
 بعد ذلك تحدد القيمة الوسطية لظل زاوية الميلان العرضي  $\text{tg } \phi$  عند استخدام أكثر من نواس في كل مرحلة من مراحل تجربة الميل.

### 1-2-3 قياس الغاطس وتحديد قوة الطفو:

لتجنب حدوث أخطاء عند حساب قوة الطفو المساوية لوزن السفينة يجري عادةً قياس غاطس السفينة المختبرة بأعلى دقة ممكنة.

يتم قياس غاطس المقدمة والمؤخرة على جانبي السفينة بواسطة زورق قبل وبعد إنجاز تجربة الميل وفقاً لعلامات الغاطس المبينة. من هذه القراءات يتم تحديد القيمة الوسطية الإجمالية لغطاس المقدمة والمؤخرة [10]. ينبغي الإشارة إلى أن علامات الغاطس الموضوعية عند المقدمة والمؤخرة تسمح بقراءة غاطس السفينة اعتباراً من الحافة السفلى للقرينة، في حين أن الغاطس على مخطط المنحنيات الهيدروستاتيكية والمخطط النظري يحدد اعتباراً من الحافة العليا. عند عدم وجود علامات لغطاس السفينة ينبغي قياس الارتفاع الجانبي للسفينة فوق سطح الماء من كلا الجانبين عند ثلاثة مواقع مختلفة في السفينة قبل و بعد إنجاز تجربة الميل. من هذه القراءات يتم تحديد القيمة الوسطية



الإجمالية للارتفاع الجانبي للسفينة عند المواقع الثلاث المختارة. يُحدد بعد ذلك خط ماء الطفو النهائي على رسمة الخطوط النظرية وفقاً لغطاس المقدمة و المؤخرة الوسطي أو وفقاً للارتفاع الجانبي الوسطي عند المواقع الثلاثة المختارة.

بعد تحديد خط ماء الطفو النهائي يُحسب حجم الجزء الغاطس من البدن وإحداثيات مركز الطفو باستخدام مقياس بونجان. يتم عادةً إجراء مثل هذه الحسابات باستخدام طريقة سيمبسون أو ترايز، وفي حال كانت الدرفة الطولية للسفينة معدومة أو صغيرة جداً فيمكن تحديد حجم الجزء الغاطس وإحداثيات مركز الطفو باستخدام صفحة المنحنيات الهيدروستاتيكية المقابلة للغطاس الوسطي.

#### 4-2-1 حساب ارتفاع الميتاسنتر:

يمكن تحديد ارتفاع الميتاسنتر للسفينة في أي مرحلة من مراحل إجراء تجربة الميل وفقاً للعلاقة التالية:

$$h_o = \frac{I \cdot \sum_{i=1}^n M_i \cdot tg \phi_i}{D \cdot \sum_{i=1}^n tg^2 \phi_i} \quad (1-5)$$

حيث إن:  $n$  - يمثل عدد مراحل تجربة الميل.

إن افتراض  $h_o = const$  سيحدث خطأ ينبغي أخذه بعين الاعتبار عند الحساب النهائي لخطأ التجربة.

#### 5-2-1 تحديد موضع مركز ثقل السفينة:

يُعطى ارتفاع مركز ثقل السفينة وفقاً للعلاقة التالية:

$$z_G = z_F + r_o - h_o = z_M - h_o$$

يحدد الإحداثي الرأسى للميتاسنتر العرضي  $z_M$  من مخطط المنحنيات الهيدروستاتيكية عند الغاطس الوسطي

$T$  المقابل لوزنها  $P$  أو لحجم جزئها الغاطس  $V$ .

يُحسب ارتفاع مركز ثقل السفينة  $z_{G_o}$  بعد تجهيزها بصورة نهائية من معادلة العزم السكوني بالنسبة للمستوي

الأساسي  $oxy$ :

$$z_{G_o} = \frac{P \cdot z_G + \sum_{i=1}^n p_{b_i} \cdot z_{b_i} - \sum_{i=1}^n p_{z_i} \cdot z_{z_i}}{P + \sum_{i=1}^n p_{b_i} - \sum_{i=1}^n p_{z_i}} \quad (1-6)$$

حيث إن:

$p_{z_i}$  - وزن حمولة زائدة.  $z_{z_i}$  - ارتفاع مركز ثقل الحمولة الزائدة.

$p_{b_i}$  - وزن حمولة ناقصة.  $z_{b_i}$  - ارتفاع مركز ثقل الحمولة الناقصة.

بُعد مركز ثقل السفينة عن المستوي القطاعي العرضي  $\infty$  في شروط التجربة سيساوي تقريباً بُعد مركز الطفو

(المحدد وفقاً لمقياس بونجان) عن هذا المستوي، أي:  $x_G \approx x_F$

أما بُعد مركز ثقل السفينة عن المستوي القطاعي العرضي  $\infty$  بعد تجهيزها بصورة نهائية فيُحسب بطريقة

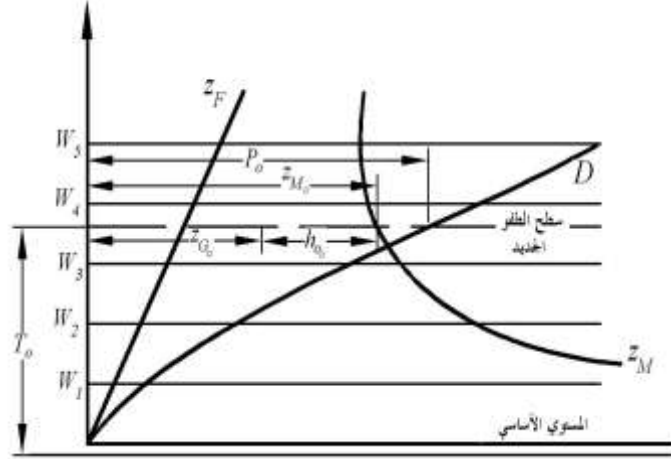
مشابهة باستخدام معادلة العزم السكوني بالنسبة للمستوي  $oyz$ :

$$x_{G_o} = \frac{P \cdot x_G + \sum_{i=1}^n p_{b_i} \cdot x_{b_i} - \sum_{i=1}^n p_{z_i} \cdot x_{z_i}}{P + \sum_{i=1}^n p_{b_i} - \sum_{i=1}^n p_{z_i}} \quad (1-7)$$

حيث إن:

$x_{b_i}$  - بُعد مركز ثقل الحمولة الناقصة عن المستوي القطاعي العرضي  $\perp$ .

$x_{z_i}$  - بُعد مركز ثقل الحمولة الزائدة عن المستوي القطاعي العرضي  $\perp$ .



الشكل (1-4)

يُحدد ارتفاع الميتاسنتر للسفينة بعد تجهيزها بصورة نهائية وفقاً للعلاقة التالية:  $h_{o_o} = z_{M_o} - z_{G_o}$ .  
يُحدد الإحداثي الرأسي للميتاسنتر العرضي  $z_{M_o}$  من مخطط المنحنيات الهيدروستاتيكية للسفينة عند الغاطس الوسطي  $T_o$  المقابل لوزنها  $P_o$  أو لحجم جزئها الغاطس  $V_o$  بعد تجهيزها بصورة نهائية كما في الشكل (1-4).  
وأخيراً يمكن تحديد إحداثيات مركز ثقل السفينة من أجل أية حالة من حالات التحميل بطريقة مشابهة تماماً لما تم ذكره.

### 6-2-1 تحديد الخطأ المحتمل للتجربة:

يتضمن الخطأ الإجمالي لتجربة الميل بالأخطاء الناتجة عن: قراءة مؤشر النواس، تحديد حجم الجزء الغاطس من البدن، تحديد وزن الحمولات المنقولة عرضياً، تحديد مقدار انتقال هذه الحمولات، حساب ارتفاع الميتاسنتر وأخيراً الخطأ الخاص بعلاقة حساب ارتفاع الميتاسنتر النهائي للسفينة.

إن الخطأ المطلق المرتكب عند قراءة مؤشر النواس يساوي تقريباً  $2 \div 3 \text{ mm}$ ، وهو ناتج عن اهتزاز وحركة خيط النواس. يرتكب هذا الخطأ مرتين، مرة عند القراءة الأولية ومرة عند القراءة النهائية، وبالتالي فإن الخطأ المطلق الكلي عند قراءة انحراف النواس يتراوح ضمن المجال  $4 \div 6 \text{ mm}$ . بما أن المسافة المقاسة على اللوحة المدرجة صغيرة نسبياً فإن الخطأ النسبي المرتكب سيكون كبيراً نوعاً ما. لإنقاص مقدار هذا الخطأ ينبغي أخذ عدة قراءات لكل نواس في كل مرحلة من مراحل تجربة الميل، ومن ثم سيتم الحصول على القراءة المعتمدة باستخدام طريقة المربعات الصغرى. بعض القراءات ولأسباب عرضية يمكن أن تكون خاطئة، للكشف عن مثل هذه القراءات الخاطئة العرضية والتي ينبغي حذفها، ينصح عادةً برسم منحنى المعاينة المبين في الشكل (1-5).

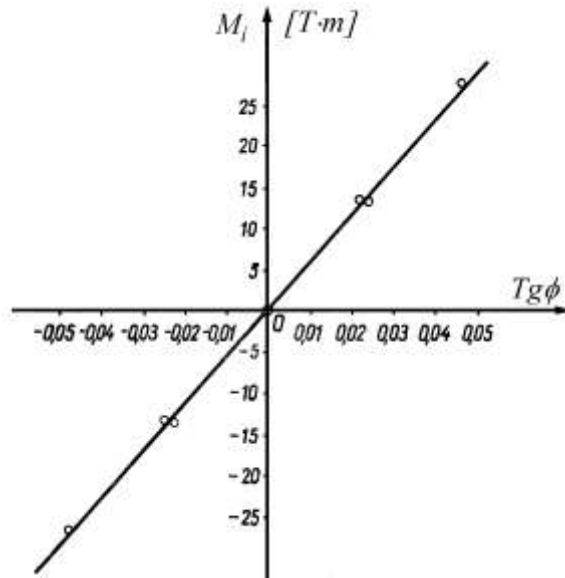
يُمثل محور الفواصل لهذا المنحني ظل زاوية الميلان العرضي المحددة بواسطة كل نواس على حدة في أية مرحلة من مراحل تجربة الميل، أما محور الترتيب فيمثل عزم الميلان العرضي الإجمالي لأية مرحلة من مراحل تجربة الميل. لإنشاء هذا المنحني تُحدد في جملة المحاور المفروضة مجموعة نقاط خاصة بكل نواس من أجل جميع مراحل تجربة الميل، ثم يُنشىء خط مستقيم مار بمبدأ الإحداثيات وبمعظم النقاط المحددة فنحصل على منحني المعاينة المطلوب. كل نقطة منحرفة بشكل كبير عند هذا الخط سيقابلها قراءة خاطئة ينبغي حذفها في الحسابات التالية. يُعطى الخطأ المطلق المرتكب عند حساب ارتفاع الميئاسنتر في جميع مراحل التجربة بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (1-8)$$

$$\varepsilon_i = h_{o_i} - h_o \quad \text{حيث إن:}$$

$n$  - عدد مراحل تجربة الميل للسفينة في حالة الميلان.

الخطأ النسبي المرتكب، عند قياس طول النواس بواسطة شريط قياس، صغير جداً بحيث يمكن إهماله. الخطأ النسبي المرتكب عند استخدام العلاقة الخاصة بحساب ارتفاع الميئاسنتر النهائي للسفينة يساوي تقريباً 1% شريطة ألا تتجاوز زاوية الميلان العرضي  $4^\circ$ . الخطأ النسبي المرتكب عند تحديد وزن الحمولات المستخدمة في التجربة ينبغي ألا يتجاوز 1%، أما الخطأ المرتكب عند قياس مسافة انتقال هذه الحمولات فينبغي ألا يتجاوز 0,5%.



الشكل (1-5)

الخطأ النسبي المرتكب عند تحديد حجم الجزء الغاطس من البدن يتعلق بدرجة الدقة في قياس غاطس السفينة. يُحسب هذا الخطأ وفقاً للعلاقة التالية:

$$\frac{\Delta V}{V} = \pm \frac{S_{WL} \cdot \Delta T}{V} \quad (1-9)$$

حيث إن:

$S_{WL}$  - مساحة سطح الطفو للسفينة في شروط التجربة.

$\Delta T$  - الخطأ المرتكب عند قياس الغاطس.

تتراوح قيمة  $\Delta T$  عادةً ضمن المجال  $(0,005 \div 0,010) m$ ، وذلك تبعاً لحالة سطح الماء أثناء التجربة.

وعند الحصول على خطأ نسبي أقل من 1% وفقاً للعلاقة الأخيرة فإن هذا الخطأ يبقى مساوياً لـ 1%، لأن حجم

الجزء الغاطس من بدن السفينة يُحدد من المخطط النظري بدقة تصل حتى 1%.

الخطأ النسبي الإجمالي لتجربة الميل يساوي مجموع الأخطاء النسبية المذكورة:

$$\frac{\delta h_o}{h_o} = \frac{\varepsilon}{h_o} + \frac{\Delta h_o}{h_o} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta y}{y} \quad (1-10)$$

أما الخطأ المطلق الإجمالي فيساوي:

$$\delta h_o = \pm h_o - \frac{\delta h_o}{h_o} \quad (1-11)$$

يُبين الجدول التالي القيم المقبولة للأخطاء النسبية المرتكبة:

الجدول (1-2)

رقم الخطأ	اسم الخطأ المرتكب	رمز الخطأ	القيمة الطبيعية للخطأ %
1	الخطأ النسبي المرتكب عند حساب ارتفاع الميتاسنتر في جميع المراحل	$\frac{\varepsilon}{h_o}$	0,5 ÷ 3
2	الخطأ النسبي المرتكب عند استخدام العلاقة الخاصة بحساب $h_o$	$\frac{\Delta h_o}{h_o}$	1,0
3	الخطأ النسبي المرتكب عند حساب حجم الجزء الغاطس من البدن	$\frac{\Delta V}{V}$	1,0 ÷ 2,0
4	الخطأ النسبي المرتكب عند تحديد وزن الحمولات المستخدمة في التجربة	$\frac{\Delta p}{p}$	1,0
5	الخطأ النسبي المرتكب عند قياس المسافة انتقال هذه الحمولات	$\frac{\Delta y}{y}$	0,5
الخطأ النسبي الإجمالي للتجربة		$\frac{\delta h_o}{h_o}$	7,0 ÷ 8,0

### 3- التطبيق العملي: تأكيداً لأهمية هذا البروتوكول واستناداً إلى ما سبق تم تطبيق الخطوات الواردة في

البروتوكول أعلاه على سفينة حقيقية وهي السفينة السورية وائل ف *WAEL F* وهي مملوكة من شركة سورية بالكامل ومصنفة كسفينة نقل حمولات متنوعة *General Cargo Vessel* وتم الحصول على معطياتها الرئيسية من الوثائق الرئيسية الموجودة في السفينة والتي يذكر فيها نتائج تجارب الإبحار الأولى *Sea Trial* وكذلك تم الاستعانة بكراس الاتزان للسفينة المذكورة، ومن المعطيات التي توفرت لدينا وبالذات من كراس الاتزان وضمائنا للنتائج الدقيقة لهذه الحسابات اعتبرنا يوم التجربة هو يوم الإبحار التجريبي للسفينة واعتمدنا الظروف المناخية نفسها والظروف المحيطة، حيث إنه قد تم تحضير السفينة وفقاً للشرط المطلوبة، وسيتم حساب ارتفاع الميتاسنتر وموضع مركز ثقل السفينة في الحالات التالية:

(a) - السفينة في شروط التجربة.

(b) - السفينة مجهزة كلياً، ولكن غير محملة.

(c) - السفينة في حالة تحميل.

ملاحظة: جميع المعطيات اللازمة والقراءات الخاصة بالتجربة سيتم إدخالها في سياق الحل نظراً لكبر عددها.  
1-3 حالة الجو عند إجراء التجربة: تم إجراء التجربة في يوم مشمس، سرعة الرياح وفق مقياس بوفورت

$$0,5^{\circ} \div 0^{\circ}, \text{المياه ساكنة تماماً، درجة حرارة الماء } 12^{\circ} C, \text{الوزن النوعي للماء } \gamma = 1,0 T / m^3.$$

2-3 ملاحظات عامة: السفينة مثبتة إلى اليابسة بواسطة كبل وحيد عند المقدمة، طوله كافٍ بحيث تستطيع

السفينة الميلان عرضياً بحرية على جانبيها. الميلان العرضي الأولي للسفينة قبل بدء التجربة معدوم. مراجل لمولدات البخار مملوءة بالمياه حتى مستوى عملها الطبيعي.

3-3 غاطس السفينة: غاطس السفينة المقروء وفقاً لعلامات الغاطس عند بداية التجربة يوضحه الجدول

التالي:

	الجانب الأيمن	الجانب الأيسر	القيمة الوسطية
عند المقدمة	2,23 m	2,25 m	2,24 m
عند المؤخرة	2,31 m	2,31 m	2,31 m

عند نهاية التجربة:

	الجانب الأيمن	الجانب الأيسر	القيمة الوسطية
عند المقدمة	2,24 m	2,24 m	2,24 m
عند المؤخرة	2,33 m	2,33 m	2,33 m

وعند الأخذ بعين الاعتبار سماكة القرينة الصماء المساوية لـ  $8 \text{ cm}$  فإن غاطس المقدمة وغطاس المؤخرة

المستخدمين على مخطط المنحنيات الهيدروستاتيكية ورسمه الخطوط النظرية سيساويان:

$$T_D = \frac{2,24 + 2,24}{2} - 0,08 = 2,16 \text{ m}$$

$$T_R = \frac{2,31 + 2,33}{2} - 0,08 = 2,24 \text{ m}$$

الخطأ المرتكب عند قياس الغاطس وفقاً لحالة سطح الماء أثناء التجربة  $\Delta T = 0,005 \text{ m}$ .

4-3 حالة تحميل السفينة وفقاً لشروط التجربة:

السفينة فارغة تماماً باستثناء وجود وقود في بعض الخزانات المخصصة له، جميع العنابر والخزانات فارغة

ومغلقة. يوجد القليل من المياه في قاع السفينة بالقرب من القرينة.

بعد قياس منسوب الوقود في الخزانات تبين أن الخزان اليساري يحتوي  $3T$ ، أما الخزان اليميني فيحتوي

$3,3T$ . من التجهيزات الناقصة على سطح السفينة لدينا مخطاف المقدمة اليميني و قارب للنجاة.

5-3 الحمولات المستخدمة أثناء التجربة لإحداث الميل:

تُستخدم كتل أو بلوكات من حديد الزهر كحمولات لازمة لإحداث ميلان عرضي أثناء التجربة. تُوضع هذه الكتل على السطح ضمن أربع مجموعات بشكل متناظر بالنسبة لمستوى التناظر، بحيث تتوضع على كل جانب من جوانب السفينة مجموعتان من المجموعات الأربعة. وزن هذه المجموعات وأماكن توضعها على سطح السفينة تُعطى كما يلي:

المجموعة رقم: ...	موقعها على امتداد طول السفينة بين الأطر الهيكلية رقم: ...	بُعد مركز ثقلها عن المستوي الأساسي [ m ]	وزنها [ T ]
1	17÷19	3,05	0,355
2	33÷35	2,95	0,346
3	17÷19	3,05	0,357
4	33÷35	2,95	0,351

الوزن الإجمالي للحمولات  $1,409T$ . مسافة الانتقال العرضي للمجموعات الأربع واحدة، وتساوي

$$. y = 3,2m$$

**3-6 توضع النواصات:** تم استخدام نواسين. النواص الأول وُضع في غرفة طعام الطاقم، طوله  $2,82m$ .

النواص الثاني وُضع في قطاع أو غرفة المحركات، طوله  $3,335m$ .

**3-7 الحمولات الزائدة أثناء إجراء التجربة:**

الرقم المتسلسل	اسم الحمولة	موقع الحمولة	وزن الحمولة $p$ [T]	إحداثيات مركز ثقل الحمولة		العزوم السكونية	
				$z_z$ اعتباراً من المستوي الأساسي [m]	$x_z$ اعتباراً من المستوي القطاعي العرضي (+) في الجزء الأمامي (-) في الجزء الخلفي [m]	بالنسبة للمستوي الأساسي $M_z$ $= 4 \times 5$ [T·m]	بالنسبة للمستوي القطاعي العرضي $M_x$ $= 4 \times 6$ [T·m]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	وقود	في خزان الوقود اليساري	3,0	1,55	1,30	4,65	3,90
2	وقود	في خزان الوقود اليمني	3,30	1,58	1,30	5,21	4,29
3	أربعة من أفراد الطاقم	في غرفة الطعام	0,30	1,80	5,50	0,54	1,65
4	سبعة من أفراد الطاقم	على السطح	0,52	3,90	-3,0	2,03	-1,56
5	أحد أفراد الطاقم	في غرفة المراجل	0,07	2,20	1,25	0,15	0,09
6	مراقب للنواص رقم 1	في غرفة طعام الطاقم	0,07	1,80	5,50	0,13	0,38

7	مراقبين للنواس رقم 2	في غرفة المحركات	0,15	1,50	3,20	0,22	0,48
8	الحمولات اللازمة لإمالة السفينة عرضياً	تتوضع بصورة متناظرة على جانبي السفينة عند السطح	1,41	3,0	-0,50	4,24	-0,71
	$\Sigma$		8,82			17,17	8,04

### 8-3 الحمولات الناقصة أثناء إجراء التجربة:

الرقم المتسلسل	اسم الحمولة	موقع الحمولة	وزن الحمولة $p$	إحداثيات مركز ثقل الحمولة		العزوم السكونية	
				$z_z$ اعتباراً من المستوي الأساسي	$x_z$ اعتباراً من المستوي القطاعي العرضي (+) في الجزء الأمامي (-) في الجزء الخلفي	بالنسبة للمستوي الأساسي $M_z$ $= 4 \times 5$	بالنسبة للمستوي القطاعي العرضي $M_x$ $= 4 \times 6$
			$[T]$	$[m]$	$[m]$	$[T \cdot m]$	$[T \cdot m]$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	مخطف المقدمة اليميني	عند السطح	0,25	3,70	11,00	0,92	2,75
2	زورق نجاة	عند السطح	0,90	4,15	-5,50	3,74	-4,95
	$\Sigma$		1,15			4,66	-2,20

### 9-3 حساب عزوم انتقال مجموعات الأحمال و عزوم الميلان العرضي الإجمالية في كل مرحلة تجربة

الميلان:

الرقم المتسلسل	وزن مجموعات الأحمال	وزن مجموعة	الانتقال العرضي الحاصل	العزم بفعال	عزم الميلان العرضي الإجمالي مجموع (6) من الأعلى
-------------------	---------------------	------------	---------------------------	-------------	--

لمراحل التجربة	على الجانب الأيسر	على الجانب الأيمن	الأحمال المنقولة [T]	(+) عند الانتقال إلى الجانب الأيمن (-) عند الانتقال إلى الجانب الأيسر [m]	الانتقال = 4 × 5 [T · m]	(-) عند الميلان على الجانب الأيسر [T · m]	(+) عند الميلان على الجانب الأيمن [T · m]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,355 0,346	0,357 0,351	0	0	0	0	0
2	0 0,346	0,355 0,357 0,351	0,355	+3,20	+1,14	---	+1,14
3	0 0	0,346 0,355 0,357 0,351	0,346	+3,20	+1,11	---	+2,25
4	0 0,436	0,355 0,357 0,351	0,346	-3,20	-1,11	---	+1,14
5	0,355 0,346	0,357 0,351	0,355	-3,20	-1,14	0	0
6	0,357 0,355 0,346	0 0,351	0,357	-3,20	-1,14	-1,14	---
7	0,351 0,357 0,355 0,346	0 0	0,351	-3,20	-1,12	-2,26	---
8	0,357 0,355 0,346	0 0,351	0,351	+3,20	+1,12	-1,14	---
9	0,355 0,346	0,357 0,351	0,357	+3,20	+1,14	0	0

10-3 مؤشرات النواسات:

الرقم التسلسلي لمراحل التجربة	اسم المراقب				النواس رقم (1) طوله $\ell = 2820 \text{ mm}$							$\sum$	وسطي $x_i$
	يسار	يمين	يسار	يمين	يسار	يمين	يسار	يمين	يسار	يمين			
1	150	156	152	158	151	155	154	157	153	154	1540	154	
2	210	214	210	216	209	215	211	213	211	213	2122	212	
3	269	272	269	271	267	273	268	271	269	272	2701	270	
4	210	214	212	216	212	216	210	215	211	214	2130	213	
5	157	160	158	160	156	159	158	162	159	160	1589	159	
6	95	98	96	99	94	99	95	100	95	99	970	97	
7	38	42	38	42	37	41	38	40	37	41	394	39	
8	93	97	93	96	92	96	92	96	91	97	943	94	
9	148	152	147	152	148	153	149	152	148	151	1500	150	

الرقم	اسم المراقب	النواس رقم (2)
-------	-------------	----------------



التسلسلي لمراحل التجربة	طوله $\ell = 3335 \text{ mm}$										$\Sigma$	وسطي $x_i$
	يسار	يمين	يسار	يمين	يسار	يمين	يسار	يمين	يسار	يمين		
1	208	212	205	214	200	210	203	210	199	211	2072	207
2	270	272	275	280	269	278	270	275	280	281	2750	275
3	342	346	340	344	342	344	339	346	340	349	3432	343
4	270	272	268	273	268	272	270	272	269	273	2707	271
5	197	199	196	200	195	202	197	201	197	200	1984	198
6	120	123	119	124	118	125	121	124	120	126	1220	122
7	54	56	53	57	55	58	56	59	55	57	560	56
8	125	127	123	127	124	127	125	128	125	128	1259	126
9	194	198	194	199	193	198	195	193	199	197	1960	196

### 11-3 تحديد زوايا الميلان العرضي في كل مرحلة من مراحل تجربة الميل:

الرقم التسلسلي لمراحل التجربة	النواس رقم (1) $\ell = 2820 \text{ mm}$				النواس رقم (2) $\ell = 3335 \text{ mm}$				(5)+(9)	وسطي $tg\phi_i = \frac{1}{2}(10)$
	مؤشر النواس $x_i$ mm	وسطي $\frac{1}{3}(x_1 + x_5 + x_9)$ mm	الانحراف ف $a_i = x_i - (3)$	$tg\phi_i = \frac{a_i}{\ell} = \frac{(4)}{2820}$	مؤشر النواس $x_i$ mm	وسطي $\frac{1}{3}(x_1 + x_5 + x_9)$ mm	الانحراف ف $a_i = x_i - (7)$	$tg\phi_i = \frac{a_i}{\ell} = \frac{(8)}{3335}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	154	154	---	0	207	200	---	0	0	0
2	212	154	58	0,0206	275	200	75	0,0226	0,0432	0,0216
3	270	154	116	0,0410	343	200	143	0,0428	0,0833	0,0419
4	213	154	59	0,0208	271	200	71	0,0212	0,0420	0,0210
5	159	154	--	0	198	200	---	0	0	0
6	97	154	-57	-0,0203	122	200	-78	-0,0233	0,0436	0,0218
7	39	154	-115	-0,0409	56	200	-144	-0,0431	0,0840	0,0420
8	94	154	-60	-0,0211	126	200	-74	-0,0221	0,0432	0,0216
9	150	154	---	0	196	200	---	0	0	0

ملاحظة: القيمة الموجبة لـ  $tg\phi$  تُقابل حالة الميلان العرضي على الجانب الأيمن للسفينة، أما القيمة السالبة فتقابل حالة الميلان على الجانب الأيسر.

### 12-3 حساب قوة الطفو ( وزن السفينة في شروط التجربة ): استناداً لغاطس المقدمة والمؤخرة المُحددين عند

إجراء هذه التجربة يمكن تحديد قوة الطفو و الإحداثي الطولي لمركز الطفو باستخدام مقياس بونجان الخاص بمساحات المقاطع العرضية عند حالة التحميل الموافقة للغاطس المعطاة.

رقم المقطع	المساحة $S_{wr} [m^2]$	معامل سيمبسون $Cs_i$	حاصل جداء $S_{wr} \cdot Cs_i$	$r_i = \frac{x_i}{d}$	حاصل جداء $S_{wr} \cdot Cs_i \cdot r_i$
1	2	3	4	5	6
0	0,4	0,25	0,1	-5	-0,5
0,5	1,04	1	1,04	-4,5	-4,68
1	2,76	0,5	1,38	-4	-5,52
1,5	5,46	1	5,46	-3,5	-19,11
2	8,6	0,75	6,45	-3	-19,35
3	13,5	2	27	-2	-54
4	16,7	1	16,7	-1	-16,7
5	16,44	2	32,88	0	0
6	15,8	1	15,8	1	15,8
7	12,82	2	25,64	2	51,28
8	7,7	0,75	5,775	3	17,325
8,5	4,6	1	4,6	3,5	16,1
9	2,44	0,5	1,22	4	4,88
9,5	1	1	1	4,5	4,5
10	0	0,25	0	5	0
$\sum_{i=0}^{10}$			<b>145,05</b>		<b>-9,95</b>

$$d = \frac{L}{n} = \frac{22,50}{10} = 2,250 \text{ m} \quad \text{طول قطاع التقسيم:}$$

حجم الجزء الغاطس من البدن:

$$V = \frac{2}{3} \cdot d \cdot \sum_{i=1}^n S_{wr_i} \cdot Cs_i = \frac{2}{3} \cdot 2,25 \cdot 144,05 = 216,5 \text{ m}^3$$

قوة الطفو مع الأخذ بعين الاعتبار الأجزاء البارزة:

$$D = \varepsilon \cdot \gamma \cdot V = 1,006 \cdot 1 \cdot 216,5 = 217,5 T$$

بُعد مركز الطفو عن المستوي القطاعي العرضي:

$$x_F = d \cdot \frac{\sum_{i=1}^n S_{wr_i} \cdot Cs_i \cdot r_i}{\sum_{i=1}^n S_{wr_i} \cdot Cs_i} = 2,25 \cdot \frac{-9,95}{144,05} = -0,155 \text{ m}$$

13-3 حساب ارتفاع الميتاسنتر في شروط التجربة:

$D = 217,5 T$								
الرقم التسلسلي لمرحلة التجربة	عزم الميلان العرضي الإجمالي $M_i$ [T·m]	$tg \phi_i$	حاصل جداء $M_i \cdot tg \phi_i$ [T·m]	$tg^2 \phi_i$	النسبة $\frac{M_i}{tg \phi_i}$ (2)/(3)	ارتفاع الميتاسنتر $h_{o_i} = \frac{(6)}{217,5}$ [m]	الخطأ المطلق في حساب ارتفاع الميتاسنتر في كل مرحلة $\varepsilon_i = h_{o_i} - h_o$ [m]	$\varepsilon_i^2$ [m <sup>2</sup> ]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	...	...	...	...

2	1,14	0,0216	0,0246	$4,66 \cdot 10^{-4}$	52,8	0,243	-0,003	$9 \cdot 10^{-6}$
3	2,25	0,0419	0,0942	$17,60 \cdot 10^{-4}$	53,7	0,247	0,001	$1 \cdot 10^{-6}$
4	1,14	0,0210	0,0239	$4,40 \cdot 10^{-4}$	54,3	0,250	0,004	$16 \cdot 10^{-6}$
5	0	0	0	0	...	...	...	...
6	-1,14	-0,0218	0,0249	$4,75 \cdot 10^{-4}$	52,2	0,240	-0,006	$36 \cdot 10^{-6}$
7	-2,26	-0,0420	0,0950	$17,65 \cdot 10^{-4}$	53,9	0,248	0,002	$4 \cdot 10^{-6}$
8	-1,14	-0,0216	0,0246	$4,66 \cdot 10^{-4}$	52,8	0,243	-0,003	$9 \cdot 10^{-6}$
9	0	0	0	0	...	...	...	...
$\Sigma$			0,2872	$53,72 \cdot 10^{-4}$				$75 \cdot 10^{-6}$

ارتفاع الميئاسنتر للسفينة في شروط التجربة:

$$h_o = \frac{1}{D} \cdot \frac{\sum 4}{\sum 5} = \frac{0,2872}{217,5 \cdot 53,72 \cdot 10^{-4}}$$

$$h_o = 0,246 \text{ m}$$

14-3 تحديد موضع مركز ثقل السفينة في شروط التجربة:

$$z_G = r_o + z_F - h_o = z_M - h$$

من مخطط المنحنيات الهيدروستاتيكية عند الغاطس المقابل لحجم الجزء الغاطس من البدن  $V$ ، نجد أن:

$$z_M = 2,904 \text{ m}$$

ومنه:

$$z_G = 2,904 - 0,246 = 2,658 \text{ m}$$

15-3 تحديد موقع مركز ثقل السفينة وارتفاع الميئاسنتر بعد تجهيزها كلياً (لكن غير محملة):

\*ملاحظة: بُد مركز ثقل السفينة في شروط التجربة عن المستوي القطاعي العرضي سيعتبر مساوياً لبُعد مركز

قوة الطفو عن هذا المستوي.

$$x_{G_o} = \frac{-40,64}{209,83} = -0,194 \text{ m} \quad (1-7) \text{ وفقاً للعلاقة}$$

$$z_{G_o} = \frac{565,49}{209,83} = -2,70 \text{ m} \quad (1-6) \text{ وفقاً للعلاقة}$$

الرقم المتسلسل	اسم الحمولة	موقع الحمولة	وزن الحمولة $P$	إحداثيات مركز ثقل الحمولة		العزوم السكونية	
				$z$ اعتباراً من المستوي الأساسي	$x$ اعتباراً من المستوي القطاعي العرضي	$M_z$	$M_x$
			$[T]$	$[m]$	$[m]$	$[T \cdot m]$	$[T \cdot m]$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	السفينة في شروط التجربة		217,5	2,658	-0,14 *	578,0	-30,4
2	الحمولات الزائدة		-8,82			-17,17	-8,04
3	الحمولات الناقصة		1,15			+4,66	-2,20
	$\Sigma$		209,83			565,49	-40,64

يُحدد الإحداثي الرأسي للميتاسنتر العرضي  $z_{M_o}$  من مخطط المنحنيات الهيدروستاتيكية عند الغاطس  $T_o$  المقابل لوزنها  $P_o$  أو لحجم الجزء الغاطس  $V_o$  من السفينة بعد تجهيزها كلياً بدون حمولة:

$$z_{M_o} = 2,906 \text{ m}$$

$$h_{o_o} = z_{M_o} - z_{G_o} = 2,906 - 2,70 = 0,206 \text{ m} \quad \text{ارتفاع الميتاسنتر العرضي:}$$

### 3-16 تحديد موقع مركز الثقل و ارتفاع الميتاسنتر للسفينة في حالة التحميل:

الرقم المتسلسل	اسم الحمولة	موقع الحمولة	وزن الحمولة $p$	إحداثيات مركز ثقل الحمولة		العزوم السكونية	
				$z$ اعتباراً من المستوي الأساسي	$x$ اعتباراً من المستوي القطاعي العرضي	$M_z$	$M_x$
			$[T]$	$[m]$	$[m]$	$[T \cdot m]$	$[T \cdot m]$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	السفينة دون حمولة		209,83	2,70	-0,194	565,5	-40,7
2	الطاقم المؤلف من 16 شخصاً	على السطح	1,04	4,10	0	4,9	0
3	ركاب عددهم 100 شخصاً	على السطح	70,0	4,10	0	287,0	0
4	مياه مراجل	في القاع المزدوج	25,0	0,25	+0,25	6,25	+6,25
5	مياه غسل	في الخزان رقم ،،،	2,8	0,25	-1,55	0,7	-4,34
6	مياه الشرب	في الخزان رقم ،،،	4,4	0,25	+2,80	1,1	+12,3
7	مواد مخزنة	في الخزان رقم ،،،	3,9	1,20	-4,50	4,68	-17,5
8	مياه صابورة	في القاع المزدوج	25,0	0,60	0	15,0	0
	$\Sigma$		341,9			785,1	-44

$$z_{G_1} = \frac{785,1}{341,9} = 2,29 \text{ m} \quad \text{بُعد مركز الثقل عن المستوى الأساسي } PP$$

$$x_{G_1} = \frac{-44}{341,9} = -0,129 \text{ m} \quad \text{بُعد مركز الثقل عن المستوى القطاعي العرضي } QQ$$

يُحدد الإحداثي الرأسي للميتاسنتر العرضي المقابل للغاطس  $T_1$  من مخطط المنحنيات الهيدروستاتيكية بدلالة

$$z_{M_1} = 2,67 \text{ m} \quad \text{أو } V_1 : P_1$$

$$h_{o_1} = z_{M_1} - z_{G_1} = 2,67 - 2,29 = 0,38 \text{ m} \quad \text{ارتفاع الميتاسنتر العرضي:}$$

### 3-17 تحديد الخطأ المطلق الإجمالي لتجربة الميل:

الخطأ المطلق المرتكب عند حساب ارتفاع الميتاسنتر في جميع مراحل تجربة الميل:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n \cdot (n-1)}} = \pm \sqrt{\frac{75 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 5}} = 0,0005 m$$

الخطأ النسبي المرتكب عند حساب ارتفاع الميثانتر في جميع مراحل تجربة الميل:

$$\frac{\varepsilon}{h_o} \cdot 100 = \frac{0,0005}{0,246} \cdot 100 = 0,2\%$$

تُحدد مساحة سطح الطفو للسفينة في شروط التجربة من صفحة المنحنيات الهيدروستاتيكية بدلالة  $T$  المقابل لـ

$$S_{WL} = 135 m^2 \quad : P \text{ أو } V$$

الخطأ النسبي المرتكب عند حساب قوة الطفو:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta D}{D} \cdot 100 &= \frac{\gamma \cdot S_{WL} \cdot \Delta T}{D} \cdot 100 = \frac{1,0 \cdot 135 \cdot 0,005}{217,5} \cdot 100 \\ &= 0,3\% \end{aligned}$$

وعند الأخذ بعين الاعتبار دقة إنجاز رسمة الخطوط النظرية فيمكن اعتبار:  $\frac{\Delta D}{D} \cdot 100 = 1\%$

الخطأ النسبي المرتكب عند استخدام العلاقة الخاصة بحساب  $h_o$ :  $\frac{\Delta h_o}{h_o} \cdot 100 = 1\%$

الخطأ النسبي المرتكب عند تحديد وزن الحمولات المستخدمة في التجربة:  $\frac{\Delta p}{p} \cdot 100 = 1\%$

الخطأ النسبي المرتكب عند قياس المسافة المقطوعة من قبل الحمولات:  $\frac{\Delta y}{y} \cdot 100 = 0,5\%$

الخطأ النسبي الإجمالي للتجربة:

$$\begin{aligned} \frac{\delta h_o}{h_o} \cdot 100 &= \left[ \frac{\varepsilon}{h_o} + \frac{\Delta h_o}{h_o} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta \ell}{\ell} \right] \cdot 100 \\ &= 0,2 + 1,0 + 1,0 + 1,0 + 0,5 + 0 = 3,7\% \end{aligned}$$

الخطأ المطلق الإجمالي للتجربة:  $\delta h_o = \pm h_o \cdot \frac{\delta h_o}{h_o} = \pm 0,246 \cdot 0,037 = \pm 0,009 m$

### الاستنتاجات:

- 1- يعتبر البروتوكول الذي تم تنظيمه في هذا البحث خطوة هامة جداً لحساب البارامترات الرئيسية لاتزان الوحدات العائمة وبدقة شديدة تضمن السلامة البحرية.
- 2- إن تعميم هذا البروتوكول يؤدي إلى رفع سوية العمل التصميمي البحري والذي بدوره يؤدي إلى كسر احتكار ترسانات بناء و ترميم وبناء السفن للحسابات التصميمية وحسابات تعديل السفن بشكل عام.
- 3- لا يمكن حساب مركز ثقل سفينة طافية وتعلوها المعدات والتجهيزات بدقة متناهية بالطرق التقليدية بل يمكن فقط بالطريقة التجريبية التي ذكرناها سابقاً.

4- في كثير من الأحيان يضطر مالكو السفن إلى تغيير الصفة الوظيفية للسفينة كتحويل سفينة نقل بضائع عامة إلى سفينة نقل مواشي وهذا يتطلب بناء إنشآت خاصة إضافةً إلى تغيير كبير في عناصر التحميل، هذا بدوره يتطلب إعداد كراسات اتزان جديدة لمختلف حالات التحميل والتي تتطلب بشكل رئيسي تحديد مركز الثقل الجديد لهذه السفينة، وتعتبر الطريقة التجريبية هي أدق طريقة لذلك.

5- تأكيداً لأهمية البروتوكول الذي تم عرضه بالتفصيل في هذا البحث وبغرض الاستفادة الحقيقية منه، سيتم تطويره بأبحاث أخرى تلحق به تجعل منه أداة بيد مطوري السفن ومصمميها.

## المراجع:

- [1]. **Derrett, D. R.** – *Ship Stability for Master and Mates* – Butterworth – Heinemann – Oxford, 2002, 45-70.
- [2]. **TAYLOR, D. A.** – *Naval Architecture* - Butterworth – Heinemann – London, 1987, 35-60.
- [3]. **VAN 'T VEER, R. and DE KAT, J.O.**, "*Experimental and numerical investigation on progressive flooding and sloshing in complex compartment geometries*", Proc. STAB 2000 Conference, Launceston, Feb. 2000, 23-75.
- [4]. **DE KAT, J.O.**, "*Dynamics of a ship with partially filled compartment*", Proc. Second International Workshop on Stability and Operational Safety of Ships, Osaka, Nov. 1996.
- [5]. **PAWLOWSKI MACIEJ** – *Cwiczenia Z Hydromechaniki Okretu* – Wydawnictwo Politechniki Gdanskiej – Gdansk 1978, 18-70.
- [6]. **DUDZIAK JAN** – *Teoria Okretu* – Wydawnicwo Morski – Gdansk 1969, 55-110.
- [7] **بريهان، ميشيل . محاضرات في هيدروديناميك السفن – طلاب السنة الرابعة هندسة بحرية – جامعة تشرين – العام الدراسي 2005 – 2006.**
- [8] **بريهان، ميشيل . محاضرات في اتزان السفن 2 – طلاب السنة الثالثة هندسة بحرية – جامعة تشرين – العام الدراسي 2005 – 2006.**
- [9] **بريهان، ميشيل، . اتزان السفن 1 – السنة الثالثة هندسة بحرية – جامعة تشرين – العام الدراسي 2005 – 2007.**
- [10] **حوا، رامي – بريهان، ميشيل – حمود، بسام . مدخل إلى الهندسة البحرية – السنة الأولى هندسة بحرية – جامعة تشرين – العام الدراسي 2003 – 2004، 120-250.**
- [11] **M/V WAEL F – Stability Booklet and Grain Booklet, Kobe Shipyard, Japan, 1982, All.**