

8.2016

הספינה ממעגן מיכאל

נתונים לאישור הנדסי לאחר השלמת הגוף



ממעגן מיכאל במוזיאון הכט, אוניברסיטת חיפה (צילום: איתמר גרינברג)

מבוא : פרופסור יק כהנוב

שחזור גרפי : אדריכלית עדינה בן-זאב

חישובים : יוסי רוט

תוכן

עמ' מס'	
3	1. מבוא.
6	2. נתוני הספינה.
10	3. מודל כלי השייט
11	4. חישובים הדרוסטטים
17	5. קריטריון היציבות
33	6. מצב ניזוק
34	7. חישוב חוזק
39	8. סיכום
40	9. רשימת מקורות
41	10. תמונות מייצגות

1. מבוא

בניית רפליקה לספינה ממעגן מיכאל

מטעניהן של אלפי שברי ספינות סוחר אותרו במהלך השנים בים התיכון. חלקן נתגלה באקראי, וחלקן במסגרת סקרים מתוכננים. גוף העץ של הספינות הללו התגלה במקרים מועטים, וגם אז, נחשפו רק חלקים ממנו בעוד עיקרו היה לשיבר ספינה' הנתון לכוחות ההרס של הים.

הספינה העתיקה ממעגן מיכאל:

ספינת הסוחר של ממעגן מיכאל נמצאה בשנת 1985, במרחק של כ- 70 מ' מחוף הים הסמוך לקיבוץ, ע"י אמי אשל חבר הקיבוץ. בעת שהדריך קורס צלילה בחוף, הבחין באבנים שאינן אופייניות לאזור, ובחלקי חרס ועץ אשר בצבצו מקרקעית הים. בדיקה ראשונית של הממצאים העלתה כי בעומק של 3 מ' מתחת למים ולחול, טמונה מפרשית סוחר עתיקה, אשר הפליגה אל החוף במאה החמישית לפנה"ס כאשר מטענה העיקרי כלל אבני צפחה כחולה ובזלת, שהיו בשימוש לבנייה וליצירת כלים אמנותיים.

חפירת הספינה וממצאיה ארכה שלוש עונות, בין השנים 1988–1989, ובוצעה ע"י צוות של ארכיאולוגים ימיים בסיוע צוות המכון ללימודי ים ע"ש ליאון רקנאטי באוניברסיטת חיפה, בלויית ארכיאולוגיים ימיים מן הארץ ומח"ל. ראש הפרויקט היה ד"ר אלישע לינדר, מייסד המכון ללימודי ים והחוג לציוויליזציות ימיות. בראש צוות החפירות עמד גיי רוסלוף מאוניברסיטת טקסס A&M, ואת המחקר שבעקבותיהן, לרבות השימור והשיחזור הוביל פרופ' יעקב כהנוב.

הממצאים שנתגלו, השימור והשחזור: בנוסף על היותה עתיקה במיוחד, הספינה ממעגן מיכאל הינה יוצאת דופן בעיקר מבחינת השתמרותו המושלמת כמעט של חלקה התחתון. מגוף הספינה שרדו השדרית בשלמותה ותת השדרית, 14 צלעות, חלקים מ- 19 לוחות (חלקם שלמים), ורכיבים פנימיים שונים. הספינה נבנתה בשיטת 'הציפוי קודם' בה לוחות הגוף חוברו במערכת צפופה של כפיסים שהוכנסו למגרעות בלוחות הסמוכים ונעלו למקומם באמצעות מסמרי עץ. בנוסף, נתפרה הספינה בחבלים בחרטום ובירכתיים. צלעות הספינה אשר הוכנסו אל הגוף שנבנה קודם לכן, חוברו אל הלוחות במסמרי נחושת.

העוגן היחיד במינו אשר נתגלה בקרבת חרטום האנייה, הוא בעל זרוע בודדת ועשוי מעץ אלון. על הכתר שבתחתית העוגן ובעין שבראשו נמצאו חבלים אשר שימשו להטלתו ולמשייתו. בין הממצאים נתגלו גם שברים של כ- 70 כלי חרס, ששימשו כנראה את הצוות בחיי היום-יום, חפצי מתכת, כלי נגר, חבלים, ענפי ריפוד וקופסאות עץ אשר שימשו כנראה לתמרוקים.

כמותם של חלקי גוף הספינה ואיכות השתמרותם, מקנים ידע רב אודות השיטות ואמצעי הבנייה של ספינות הסוחר העתיקות. הממצאים מאפשרים לעקוב מקרוב אחר פרטי עבודתם של בעלי המקצוע אשר עשו במלאכת הבנייה.

גוף הספינה ממעגן מיכאל, אשר פורק לחלקים במהלך החפירה התת-ימית, עבר תהליך שימור שנמשך שבע שנים. לאחר השימור, הורכבה הספינה מחדש במוזיאון הכט שבאוניברסיטת חיפה. תהליך הבנייה מחדש נמשך שלוש שנים והושלם בשנת 1999. במחקר הספינה שותפו חוקרים רבים וסטודנטים. הספינה ומחקרה פורסמו בשלושה ספרים ועשרות מאמרים.

פרויקט בניית הרפליקה:

לצורך קידום המחקר וההוראה בנושא הספנות בעת העתיקה בכלל והעמקת הידע על הספינה ממעגן מיכאל בפרט, אנו מבקשים לבנות רפליקה אשר תידמה לספינה המקורית, תבנה תוך שימוש בטכניקה זהה, ותפליג בים. הרפליקה תשמש כספינת לימוד ומחקר החל משלב התכנון, דרך הבנייה ועד לביצוע הפלגות לימודיות ומחקריות. הספינה תבנה על-ידי תלמידי מחקר של האוניברסיטה במסגרת עבודות דוקטורט ומוסמך ועל-ידי מתנדבים. בבניית הרפליקה יילמדו לקחי פרויקטים דומים שהתקיימו בעולם ביניהם, שחזור ספינת סוחר מן המאה הרביעית לפנה"ס בקפריסין, שחזור ספינה מהמאה השישית לפנה"ס במרסיי, צרפת, ובניית רפליקות לספינות ויקינגיות שנתגלו ברוסקילדה שבדנמרק. הפרויקט כולו, יתקיים תוך שיתוף פעולה בין מכון ליאון רקנאטי ללימודי ים והחוג לציוויליזציות ימיות של אוניברסיטת חיפה, בית הספר לקציני ים בעכו רשות העתיקות ורפאל. השלב הראשון במהלכו תושלם מלאכת הבנייה יארך כשנה וחצי. לאחר בנייתה, תעגון הספינה במרינה בעכו ותתוחזק ע"י צוות בית הספר לקציני ים והאוניברסיטה. הפרויקט ילווה בעבודה מחקרית תוך ליווי אקדמי של צוות חוקרים ומתמחים.

פרופ' יעקב כהנוב

1.2. המשך המבוא.

המחקר למציאת נתוני הספינה ממעגן מיכאל נעשה בחוג לציויליזציות ימיות, באוניברסיטת חיפה והסתיים בשנת 2004. מטרתו הייתה להשלים ולשחזר את הספינה ולהגיע להחלטות בנוגע לצורתה, אורכה, רוחבה וגובהה, צורת החרטום והירכתיים וגובהם והזוויות בהן עולים הקנה והעצה מהמחברים שבשידורית, ליצור תכנית לוחות ולאחר מכן, לוודא את נכונות הפיתרון על ידי בדיקת תכונות השיט שלה, כמו: הדחק, כשר נשיאה, יכולת הפלגה ויציבות.

כל זאת, כשהיעד הוא להשתמש בנתונים שיתקבלו, לבנית רפליקה של הספינה, שתדמה לספינה המקורית ותבנה מחומרים דומים ובשיטות דומות לאילו שהשתמשו בהם בוני הספינות במאה החמישית והרביעית לפני הספירה ולבצע בה הפלגות ניסיוניות.

תחילה נעשה שימוש בממצא הארכיאולוגי (ראה צילום בשער). נעשה שימוש בכל השרטוטים והמדידות שנעשו בעבר על ידי J. Rosloff ואחרים. שרטוטים אילו כוללים את ממצאי כל אחת מהצלעות בנפרד ואת מיקומן בספינה, את השידורית, הקנה, העצה, שתי הברכיים, מעטפת הלוחות, מיקומן ומידותיהן של שתי הלזבזות ומיקומם וצורתם של המחברים בצלעות ובשידורית. שימוש נוסף נעשה במחקרים שקדמו לעבודה זו הן לגבי הספינה ממעגן מיכאל, והן לגבי טרופות דומות שנתגלו במרחב הים התיכון, ומתוארכות לתקופות קרובות לתקופתה, שתועדו, נחקרו ואפילו נבנו, כמו הקירניה, ז'ול וורן – 7.

להערכת צורתה של הספינה מהמקום בו הנתונים הארכיאולוגיים חדלים מלספק מידע, פנינו לאיקונוגרפיה: (ציורי כדים, דגמי חרס של ספינות, גרפיטו, ציורי קיר). נעשה ניסיון לעצב את צורתה השלמה של הספינה ממעגן מיכאל, על פי ניתוח, בדיקה והשוואה של מספר מקורות איקונוגרפיים, מהמאות השישית והחמישית לפסה"נ, שנמצאו מתאימים.

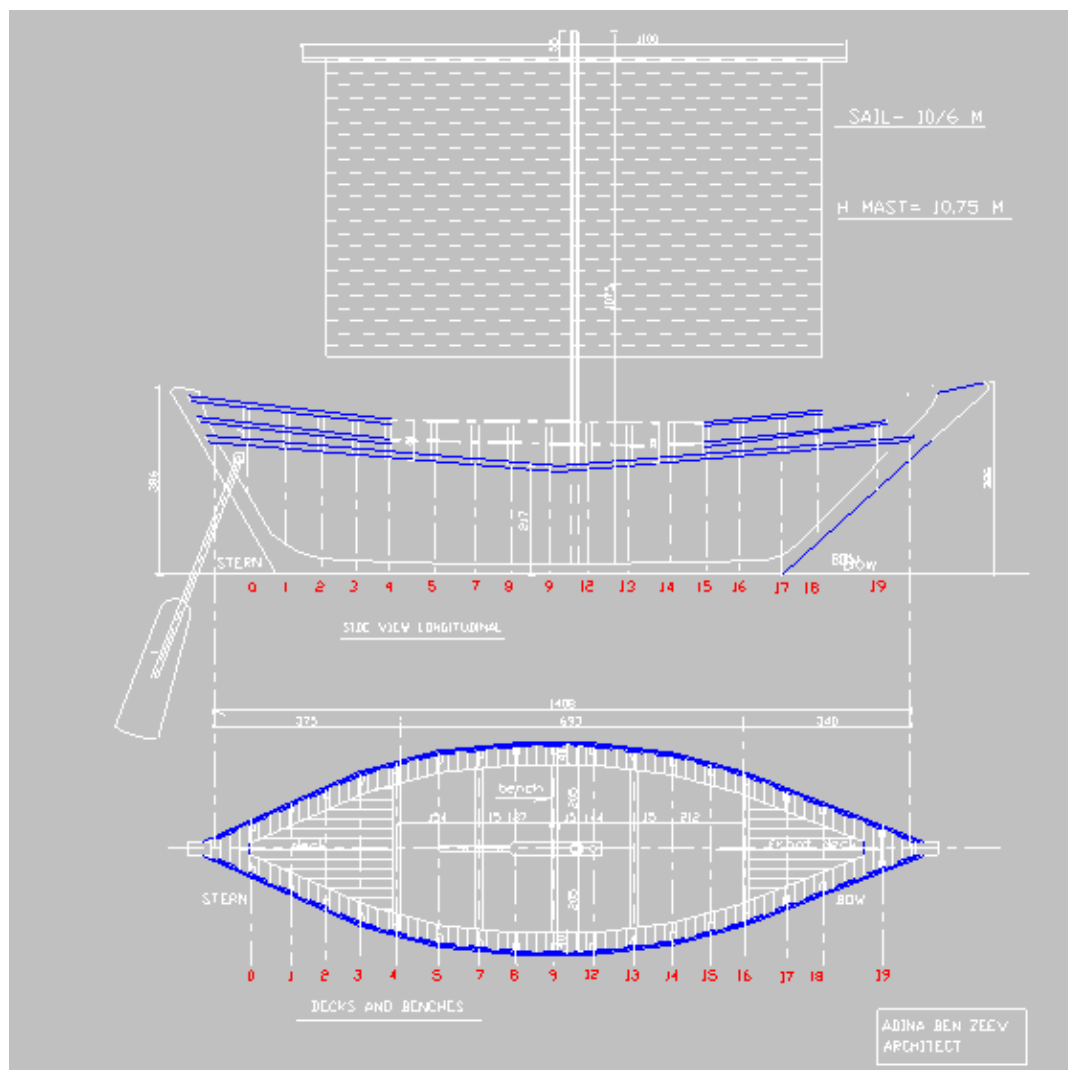
הנתונים שנתקבלו, תורגמו בשרטוט לקווי גוף שתחילתם בממצא הארכיאולוגי, עד לקו המים שנקבע על פי הצלע הגבוהה ביותר בממצא, והיווה מישור הפרדה בין הקיים והידוע לבין המוצע. ישום המסקנות שהוסקו מהניתוח האיקונוגרפי, החל למעשה מעל למישור הפרדה זה. העבודה התבצעה במקביל לבניית דגם בקנה מידה של 1:10, תוך כדי התאמה ותיקון הדדיים.

השלב הבא היה השוואת מקדמים של הספינה ממעגן מיכאל עם מקדמיהן של הטרופות הנזכרות לעיל, מתוך ניסיון להסיק מסקנות, ובעיקר לבדוק את הנתונים שנתקבלו.

עם השלמת קווי הגוף, הגיע השלב של בדיקת התכונות ההידרוסטטיות של הספינה המוצעת. קווי הגוף נמסרו לבדיקת כושר השיט, (נעשתה בדיקה מקצועית בעזרת תוכנה מתאימה) וכן, נבדקו המידות המינימליות האפשריות מבלי לפגום בכושר השיט שלה.

2. נתוני כלי השייט

2.1. סידור כללי



נתוני הספינה

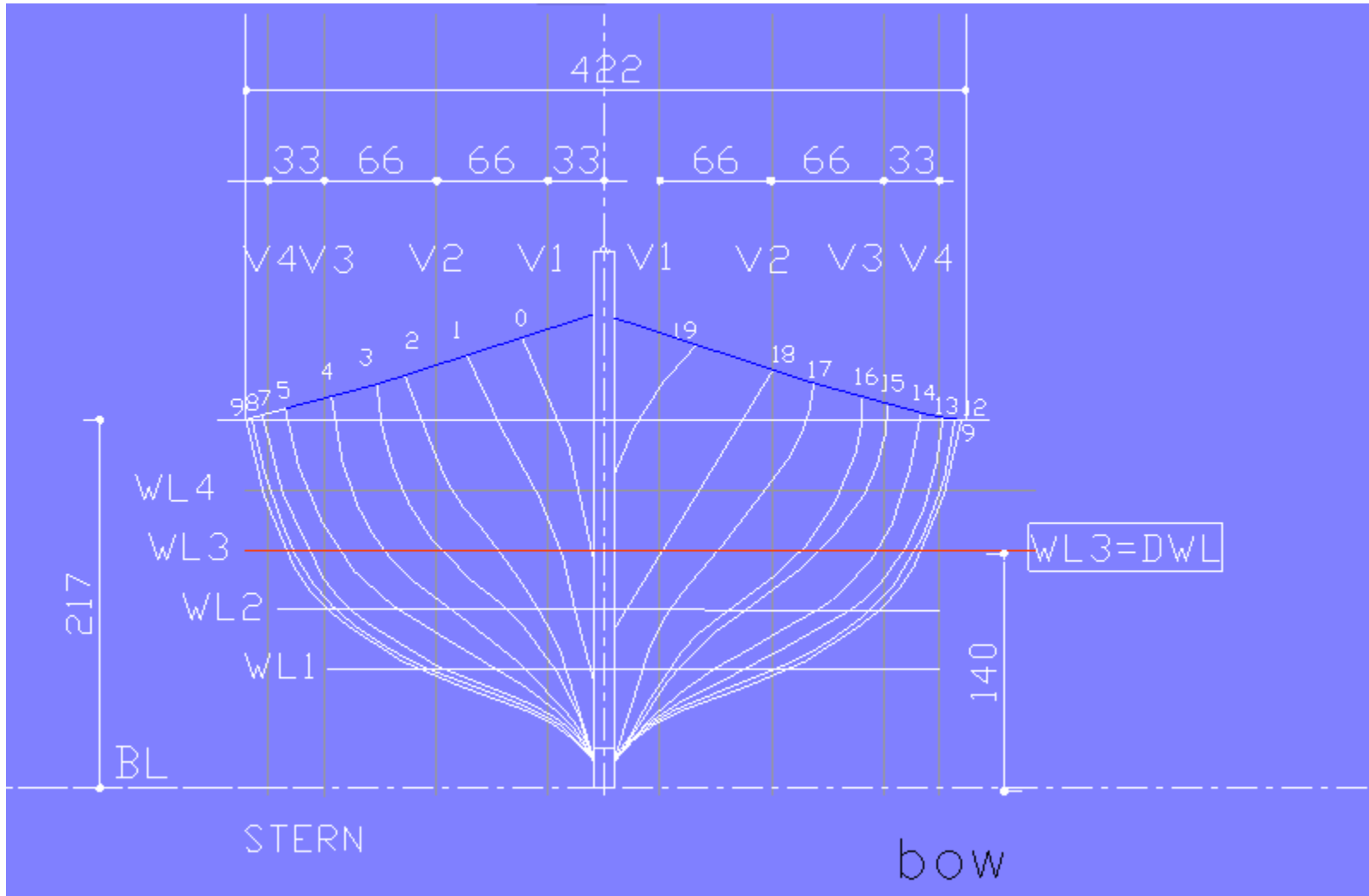
ספינת עץ אורן

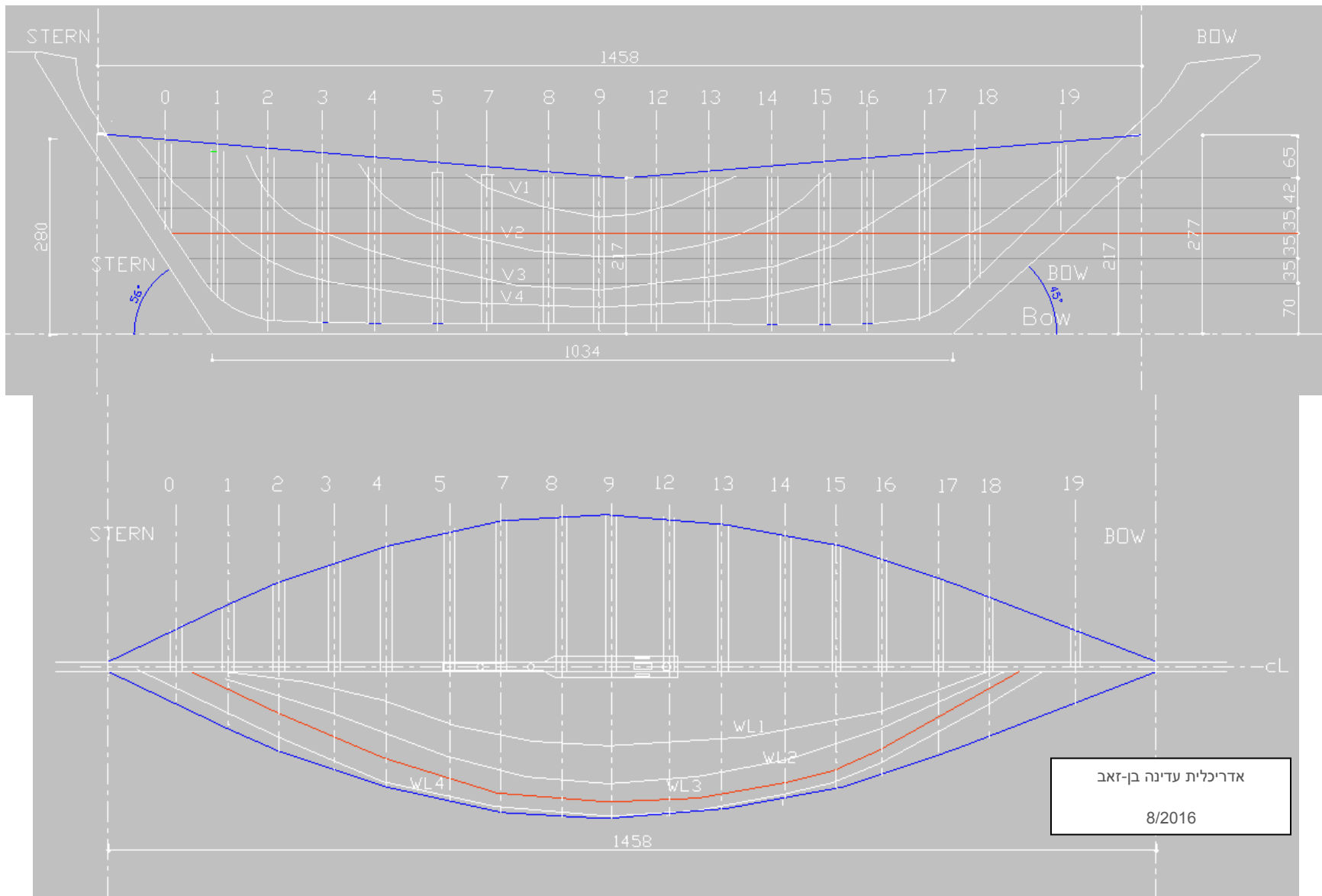
אורך כללי 15.50 מ'

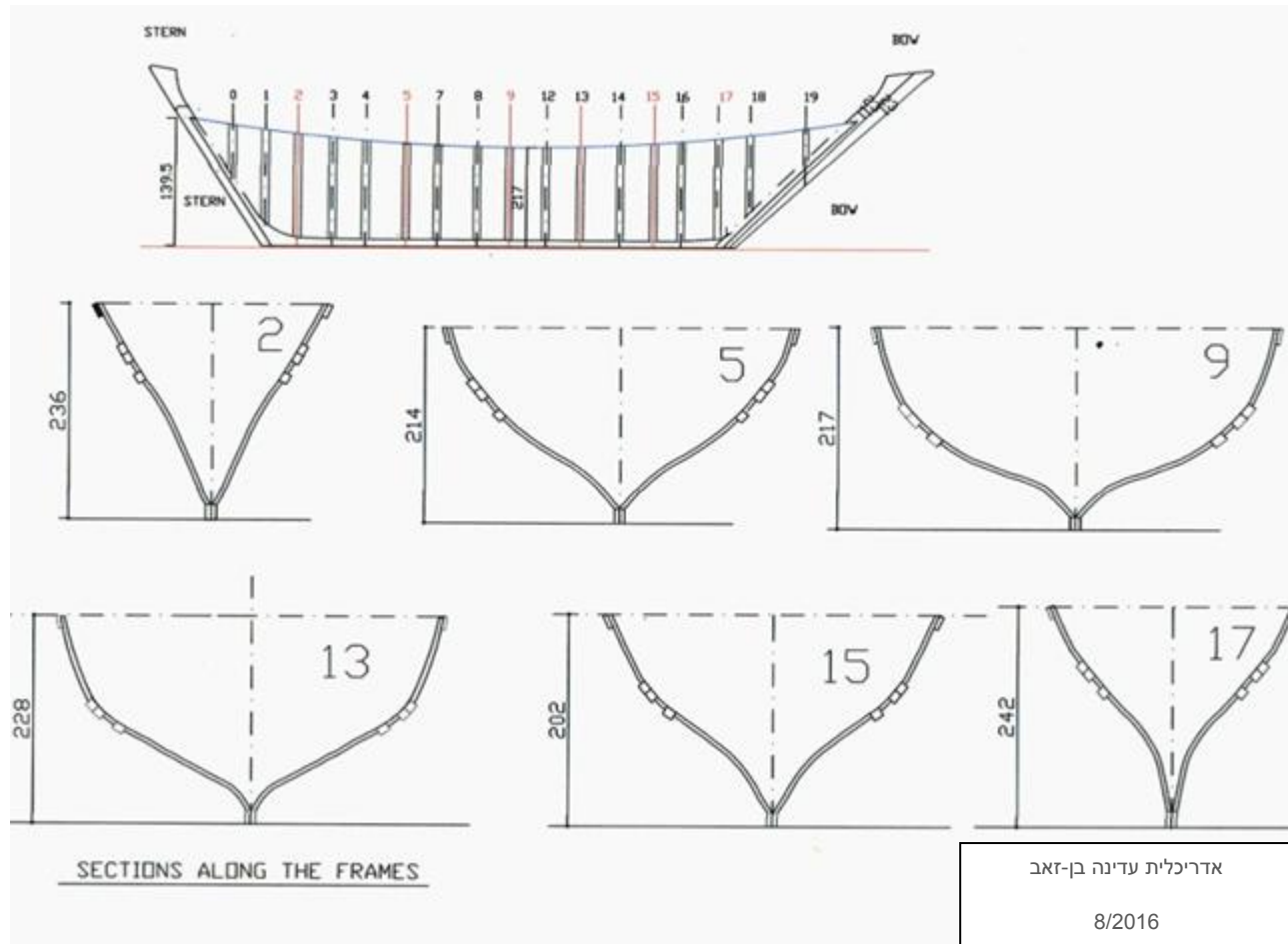
רוחב מכסימאלי 4.22 מ'

שוקע מתוכנן 1.161 מ'

שטח מפרש 60 מ"ר



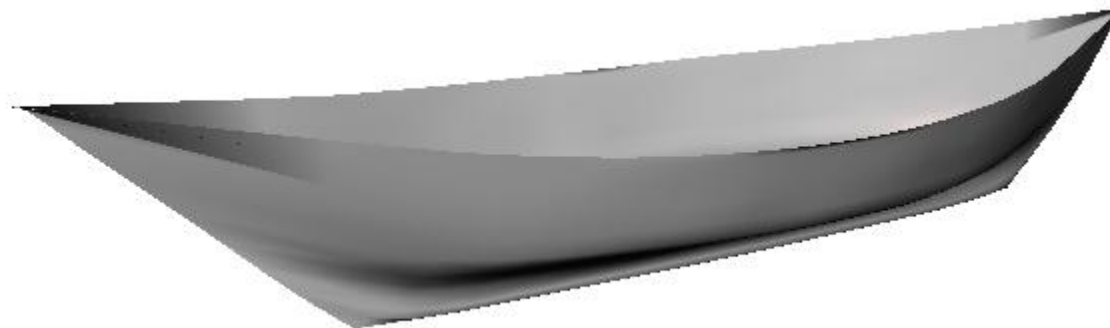




3. מודל ממוחשב של כלי השייט

נתוני קווי הגוף הורצו בתוכנת Prolines 7 PRO

להלן המודל שנקלט :



4. חישובים הדרוסטטים

4.1. חישובי משקל ודחי:

לחישוב נפח העץ של כלי השייט נלקח ליווח (חומר הדופן ע"פ מקור מס' 1) מייצג באורך המכסימאלי של כלי השייט, כנ"ל לגבי הרחב.

אורך מייצג לליווח 15.5 מ'

חצי רוחב מתמשך מייצג לליווח 3.5 מ'

עובי מייצג לליווח 0.0425 מ'

הנפח הכללי של הליווח :

$$V = 15.5 \times 2 \times 3.5 \times 0.0425 = 4.611 \text{ מ"ק}$$

$$17 \times 6 \times 0.2 \times 0.2 = 3.36 \text{ מ"ק} \quad \underline{\text{תוספת צלעות}}$$

תוספת שדרית חרטום וירכתיים :

$$10 \times 0.2 \times 0.15 = 0.30 \text{ מ"ק} \quad \underline{\text{שדרית}}$$

$$5.5 \times 0.1 \times 0.2 = 0.11 \text{ מ"ק} \quad \underline{\text{קורת חרטום}}$$

$$4.6 \times 0.1 \times 0.2 = 0.092 \text{ מ"ק} \quad \underline{\text{קורת יכתיים}}$$

$$\text{נפח ספון מ"ק} = 0.48 = 3 \times 3 \times 0.04 + 10 \times 0.3 \times 0.04$$

תוספת 10% צלוע מקומי

משקל סגולי של עץ אורן 0.56 ק"ג למ"ק , לאחר תוספת לחות 35% לחות יהיה 0.756 ק"ג למ"ק.

תוספות עץ נוספות מוערכות : מעקות סיפון, תורן, מנור חיזוקי סיפון נקודות קשירה 1.0 טון

משקלים נוספים : מסמרות , גנראטור , מצברים , גלגלות, חבלים, מפרש ועוד 1.0 טון

4.2. הערכת מרכז הכובד של הגוף :

מרכיב	משקל (טון)	מיקום מרכז כובד מעל קו הבסיס (מ')	מומנט (טון מ')
ליווח	3.846	1.010	3.884
צלוע	2.540	1.010	2.565
שדרית	0.227	0.100	0.023
קורת חרטום	0.083	1.150	0.095
קורת ירכתיים	0.070	1.150	0.081
סיפון	0.363	2.200	0.799
צלוע מקומי	0.666	1.010	0.673
תורן זרוע, נקודות קשירה	1.000	2.000	2.000
מסמרות גנרטור, מצבר גלגלות, חבלים	1.000	1.000	1.000
תוצאה	9.795	1.135	11.120

במסגרת ההשקה הסופית יבוצעו שקילה והטיה לצורך קביעת משקל סופי ומיקום מרכז הכובד!

4.3. כלי השייט מתוכנן להוביל 15 אנשים בדחי מלא, משקל אדם ממוצע ע"פ התקנים 75 ק"ג, משקל האנשים יהיה :

$$Wp fl = 75 \times 15 = 1.125 \text{ טון}$$

המטען בדחי קל (לפי 2 אנשים) יהיה :

$$Wp ls = 75 \times 2 = 0.150 \text{ טון}$$

מרכז הכובד של האנשים 1 מ' מעל הסיפון יהיה 3.53 מ' מעל קו הבסיס.

כדי לאזן את כלי השיט נוסף נטל במשקל 1 טון להגדלת היציבות.

מקום מרכז הכובד של הנטל יהיה 0.30 מ' מעל קו הבסיס.

4.4. חשוב משקל ומרכז כובד לדחי קל :

תאור	משקל (טון)	מעל קו הבסיס (מ')	מומנט (טון מ')
גוף הספינה	9.795	1.135	11.117
2 אנשים	0.150	3.530	0.530
נטל	2.000	0.300	0.600
תוצאה	11.945	1.025	12.247

$$W ls = 11.945 \text{ טון}$$

$$\text{מטר (מעל קו הבסיס)} C.G. ls = 1.025$$

מהרצה ממוחשבת של מודל כלי השייט, עבור דחי קל מתקבל שוקע 1.121 מ' ולכן מיקום מרכז הכובד ביחס לקו המים יהיו

$$\text{מטר (מעל לקו המים)} V.C.G = 1.121 - 1.025 = 0.096$$

בעמוד הבא נתונים הדרוסטטים לדחי קל.

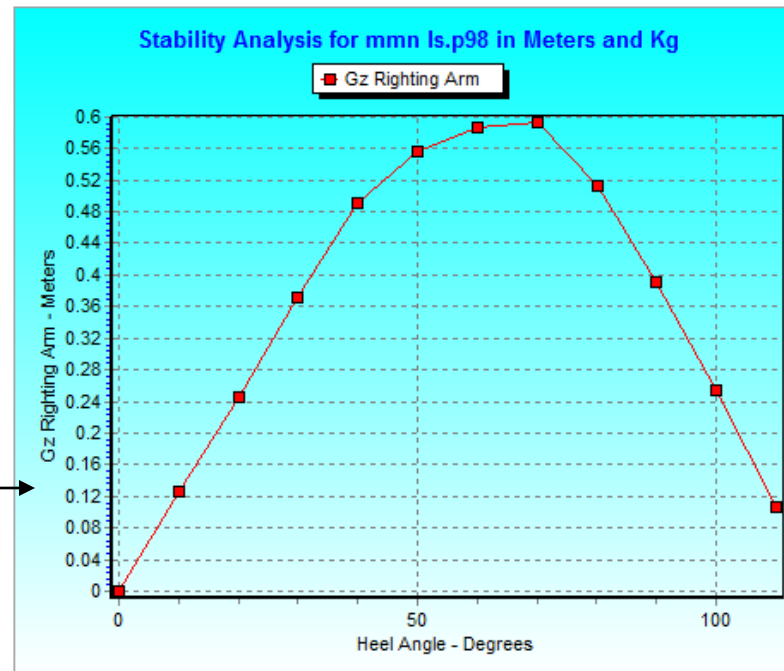
4.5 להלן נתוני הדרוסטטיקה דחי קל :

PROLINES V7 Hydrostatics Analysis For...D:\jorol\מעגן מיכאל\mmn ls.p98...

Units are Kg & Meters or 1000*Kg & Meters

Ang	Disp	Trim	LWL	Draft	BmWL	WPln	WSurf	Cp	Cb	Cw	LCB	VCB	TCB	LCF	VCGx	VCGz	LCG
0.00	11944.5	0.00	12.184	1.121	3.293	22.820	34.883	0.526	0.259	0.569	8.017	-0.343	0.000	8.004	0.000	0.096	7.868
10.00	11946.1	0.00	12.148	1.086	3.271	22.759	34.845	0.524	0.270	0.573	8.015	-0.337	0.141	8.007	0.017	0.113	7.868
20.00	11964.2	0.00	12.043	0.985	3.286	22.952	34.426	0.519	0.299	0.580	8.009	-0.320	0.277	8.013	0.033	0.162	7.868
30.00	11944.4	0.00	11.855	0.823	3.286	23.765	34.436	0.510	0.364	0.610	8.001	-0.298	0.419	8.018	0.048	0.238	7.868
40.00	11950.9	0.00	11.579	0.820	2.779	23.068	34.705	0.512	0.442	0.717	7.987	-0.287	0.552	8.013	0.062	0.324	7.868
50.00	11966.1	0.00	11.233	0.930	2.543	22.098	35.289	0.529	0.439	0.774	7.963	-0.308	0.628	8.015	0.074	0.396	7.868
60.00	11931.3	0.00	10.700	1.051	2.512	21.959	35.384	0.557	0.412	0.817	7.953	-0.356	0.669	8.145	0.083	0.449	7.868
70.00	11944.3	0.00	10.251	1.195	2.573	18.851	31.873	0.589	0.370	0.715	7.949	-0.427	0.684	7.942	0.090	0.481	7.868
80.00	11962.5	0.00	11.191	1.381	1.914	16.409	31.045	0.556	0.394	0.766	7.963	-0.473	0.606	8.028	0.095	0.530	7.868
90.00	11935.1	0.00	12.111	1.530	1.774	15.124	30.838	0.528	0.354	0.704	8.000	-0.503	0.486	8.146	0.096	0.580	7.868
100.00	11948.2	0.00	13.080	1.614	1.705	15.105	31.772	0.508	0.324	0.677	7.985	-0.511	0.349	8.059	0.095	0.629	7.868
110.00	11938.6	0.00	14.250	1.643	1.685	15.375	32.468	0.484	0.295	0.640	8.016	-0.506	0.197	8.082	0.090	0.665	7.868

Ang	Bmt	Gmt	Bml	Gml	Gz
0.000	1.168	0.728	11.219	10.780	0.000
10.000	1.138	0.688	11.303	10.853	0.125
20.000	1.140	0.658	11.545	11.063	0.245
30.000	1.256	0.720	11.957	11.421	0.371
40.000	1.078	0.467	12.483	11.871	0.490
50.000	0.920	0.216	12.975	12.271	0.555
60.000	0.868	0.064	12.948	12.143	0.586
70.000	0.549	-0.359	11.283	10.375	0.593
80.000	0.340	-0.663	10.051	9.047	0.512
90.000	0.261	-0.822	9.638	8.555	0.390
100.000	0.229	-0.911	11.176	10.036	0.255
110.000	0.221	-0.950	12.066	10.895	0.107



עקומת היציבות לדחי קל →

4.6. חשוב משקל ומרכז כובד לדחי מלא :

מומנט (טון מ')	מעל קו הבסיס (מ')	משקל (טון)	תאור
12.244	1.025	11.945	ספינה בדחי קל
3.442	3.530	0.975	תוספת 13 אנשים
15.685	1.214	12.920	תוצאה

חשוב המשקל ומרכז הכובד לדחי מלא :

$$W_{fl} = 12.929 \text{ טון}$$

$$C.G._{fl} = 1.214 \text{ (מעל קו הבסיס) מטר}$$

מהרצה ממוחשבת של מודל כלי השייט, עבור דחי מלא מתקבל שוקע 1.162 מ' ולכן מיקום מרכז הכובד ביחס לקו המים יהיה :

$$V.C.G._{ls} = 1.214 - 1.162 = 0.052 \text{ (מעל לקו המים) מטר}$$

נתוני הדרוסטטיקה דחי מלא

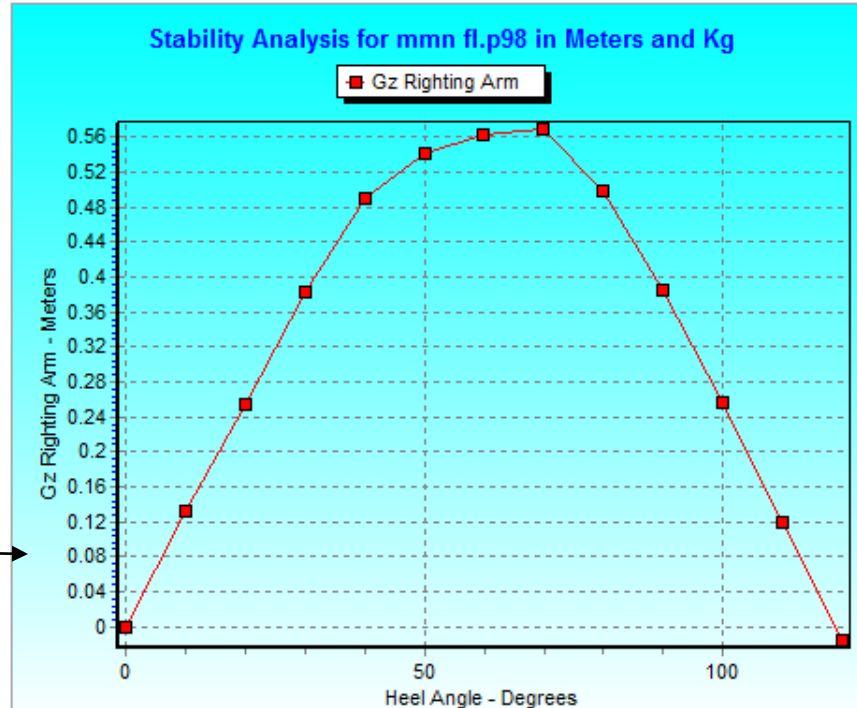
4.7. להלן נתוני הדרוסטטיקה דחי מלא:

PROLINES V7 Hydrostatics Analysis For...D:\jorolמעגן מיכאל\כלי שיט\mmn fl.p98...

Units are Kg & Meters or 1000*Kg & Meters

Ang	Disp	Trim	LWL	Draft	BmWL	WPln	WSurf	Cp	Cb	Cw	LCB	VCB	TCB	LCF	VCGx	VCGz	LCG
0.00	12919.5	0.00	12.260	1.162	3.364	23.630	36.179	0.526	0.263	0.573	8.015	-0.357	0.000	8.005	0.000	0.052	7.868
10.00	12920.6	0.00	12.225	1.127	3.338	23.543	35.793	0.525	0.274	0.577	8.013	-0.351	0.140	8.008	0.009	0.069	7.868
20.00	12937.0	0.00	12.122	1.025	3.349	23.665	35.770	0.521	0.303	0.583	8.009	-0.335	0.272	8.014	0.018	0.118	7.868
30.00	12941.5	0.00	11.940	0.863	3.268	24.381	35.226	0.513	0.375	0.625	8.002	-0.314	0.408	8.018	0.026	0.195	7.868
40.00	12920.5	0.00	11.680	0.860	2.747	23.269	36.187	0.519	0.457	0.725	7.988	-0.305	0.523	8.021	0.033	0.281	7.868
50.00	12937.7	0.00	11.352	0.972	2.495	22.370	37.049	0.538	0.458	0.790	7.968	-0.325	0.582	8.037	0.040	0.351	7.868
60.00	12902.7	0.00	10.882	1.093	2.490	22.049	36.899	0.564	0.425	0.814	7.963	-0.370	0.607	8.136	0.045	0.405	7.868
70.00	12920.8	0.00	10.476	1.243	2.599	22.878	35.258	0.592	0.372	0.840	7.951	-0.441	0.618	8.003	0.049	0.432	7.868
80.00	12927.8	0.00	11.445	1.437	1.941	17.269	32.918	0.556	0.395	0.777	7.963	-0.491	0.550	8.025	0.051	0.475	7.868
90.00	12898.1	0.00	12.404	1.588	1.799	15.851	32.494	0.527	0.355	0.710	8.000	-0.523	0.437	8.142	0.052	0.521	7.868
100.00	12916.4	0.00	13.410	1.674	1.730	15.818	33.345	0.507	0.325	0.682	7.982	-0.530	0.309	8.047	0.051	0.570	7.868
110.00	12910.6	0.00	14.621	1.702	1.712	16.125	34.274	0.482	0.296	0.644	8.013	-0.525	0.166	8.068	0.049	0.607	7.868
120.00	12937.2	0.00	14.627	1.667	1.745	16.910	35.823	0.505	0.297	0.662	8.024	-0.500	0.029	8.060	0.045	0.638	7.868

Ang	Bmt	Gmt	Bml	Gml	Gz
0.000	1.174	0.765	10.933	10.524	0.000
10.000	1.140	0.720	11.012	10.592	0.131
20.000	1.131	0.678	11.221	10.768	0.255
30.000	1.221	0.713	11.618	11.109	0.382
40.000	0.988	0.402	12.058	11.472	0.490
50.000	0.836	0.159	12.656	11.979	0.542
60.000	0.781	0.006	12.479	11.705	0.562
70.000	0.852	-0.020	14.607	13.735	0.569
80.000	0.349	-0.616	10.269	9.303	0.498
90.000	0.265	-0.779	9.804	8.761	0.385
100.000	0.231	-0.869	11.416	10.316	0.257
110.000	0.222	-0.909	12.415	11.284	0.118
120.000	0.237	-0.901	14.372	13.234	-0.016



עקומת היציבות לדחי מלא →

5. קריטריון היציבות (ע"פ מקור מס' 3)

5.1. דחי קל

ן. השטח שמתחת עקום היציבות עד 30° לא יהיה פחות מ 0.055 m rad :

$$\underline{A(30) = 0.097 \text{ m rad} > 0.055 \text{ m rad}}$$

ן. השטח שמתחת לעקום היציבות עד 40° יהיה לפחות 0.09 m rad :

$$\underline{A(40) = 0.171 \text{ m rad} > 0.09 \text{ m rad}}$$

III. השטח בין הזוויות 30° ל 40°

$$\underline{A(40) - A(30) = 0.171 - 0.097 = 0.074 \text{ m rad} > 0.030 \text{ m rad}}$$

IV. מתוך טבלת תוצאות החישובים ההידרוסטטיים ניתן לראות את ערכי זרוע היציבות

$$\underline{GZ(30) = 0.371 \text{ m} > 0.2 \text{ m}}$$

V. מתוך הטבלה הנ"ל ניתן לראות :

$$\underline{GZ \text{ Max @ } 70^\circ > 25^\circ}$$

VI. מתוך הטבלה הנ"ל ניתן לראות :

$$\underline{GM(0) = 0.728 \text{ m} > 0.5 \text{ m}}$$

5.2. חשב המומנטים בדחי קל

מומט ההטיה לרוח קבועה במפרשים אסופים ע"פ לחץ רוח של 51.4 kg/m^2 חושב לפי :

$$\text{Moment 1} = 51.4 (\text{Orl} \times \text{Arl} + \text{Otuig} \times \text{Atuig})$$

מומט ההטיה למשב רוח במפרשים אסופים ע"פ לחץ רוח של 77.1 kg/m^2 חושב לפי :

$$\text{Moment 2} = 77.1 (\text{Orl} \times \text{Arl} + \text{Otuig} \times \text{Atuig})$$

מומט ההטיה לרוח קבועה במפרשים מלאים ע"פ לחץ רוח של 7 kg/m^2 חושב לפי :

$$\text{Moment 1} = 7 (\text{Orl} \times \text{Arl} + \text{Osail} \times \text{Asail})$$

מומט ההטיה למשב רוח במפרשים מלאים ע"פ לחץ רוח של 10.5 kg/m^2 חושב לפי :

$$\text{Moment 2} = 10.5 (\text{Orl} \times \text{Arl} + \text{Osail} \times \text{Asail})$$

Orl - שטח פני הספינה כמפרש לרוח מעל קו המים:

$$\underline{\text{Orl} = 15.74 \text{ מ}^2}$$

Arl - המרחק בין מרכז השטח Orl למרכז השטח ה התת - מימי :

$$\underline{\text{Arl} = 1.09 \text{ מ}^2}$$

Otuig - שטח מערך הרמת המפרשים כולל תרנים ע"פ קוטר ממוצע של התרנים +כבלים ומעלנים :

$$\underline{\text{Otuig} = 3.00 \text{ מ'}}$$

Atuig - המרחק בין חצי הגובה של התורן לבין מרכז השטח התת מימי :

$$\underline{\text{Atuig} = 5.61 \text{ מ'}}$$

Osail - שטח המפרש :

$$\underline{\text{Osail} = 60 \text{ מ'}}$$

Asail - המרחק בין מרכז שטח המפרש לחצי השוקע:

$$\underline{\text{Asail} = 6.11 \text{ מ'}}$$

המומנטים חושבו ע"פ הנתונים הנ"ל והם:

$$\underline{\text{Moment 1 (51.4)} = 1746.9 \text{ מ' ק"ג}}$$

$$\underline{\text{Moment 2 (77.1)} = 2620.4 \text{ מ' ק"ג}}$$

$$\underline{\text{Moment 1 (7)} = 1716.23 \text{ מ' ק"ג}}$$

$$\underline{\text{Moment 2 (10.5)} = 4029.4 \text{ מ' ק"ג}}$$

כדי לקבל את עקום זרוע המומנט חולקו המומנטים כל אחד בנפרד בהדחק 11945 ק"ג ונכפלו ב $(\cos \phi)^2$

ϕ	$(\cos \phi)^2$	L(51.4) (m)	L(77.1) (m)	L(7) (m)	L9(10.5) (m)
0	1.000	0.146	0.219	0.225	0.337
10	0.970	0.142	0.212	0.218	0.327
20	0.880	0.128	0.193	0.198	0.297
30	0.750	0.110	0.164	0.169	0.253
40	0.590	0.086	0.129	0.133	0.199
50	0.410	0.060	0.090	0.092	0.138
60	0.250	0.037	0.055	0.056	0.084
70	0.120	0.018	0.026	0.027	0.040
80	0.030	0.004	0.007	0.007	0.010
90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

התוצאות הוספו בצורה גרפית לעקום זרוע היציבות ראה עמודים 23 , 24

5.3 חשוב Phi O

הטית הספינה בנקודה Phi O לא תעלה על 20° :

5.4 חשוב Phi C

Phi A היינו משרעת התנודה העצמית עקב גלים והוא יחושב בדרך הבאה:

$$\text{Phi A} = 109 \times K \times C1 \times C2 \times \sqrt{r \times s}$$

$$C1 (B/d = 4.488) = 0.80 \quad C2 (CB = 0.259) = 0.75$$

$$AK = 0.25 \times 10.5 = 2.625 ; AK 100/BL = 2.625 \times 100 / (15 \times 4.22) = 4.11 \quad K = 0.7$$

$$r = 0.73 + / - 0.6 \times OG/d$$

$$OG - \text{המרחק בין מרכז הכובד לקו המים} = 0.096 \text{ מ'}$$

$$r = 0.73 + 0.6 \times 0.096/1.121 = 0.778 \text{ מ'}$$

$$T = 2 \times C \times B / \sqrt{GM} ; c = 0.373 + 0.023 (B/d) - 0.043 (L/100) = 0.373 + 0.023 (4.22/1.121) - 0.043 (15/100) = 0.453$$

$$T = 2 \times 0.453 \times 4.22 / \sqrt{0.728} = 4.48 \text{ ש'}$$

$$s = 0.1$$

$$\text{Phi A} = 109 \times 0.7 \times 0.8 \times 0.75 \times \sqrt{0.73 \times 0.1} = 12.37^\circ$$

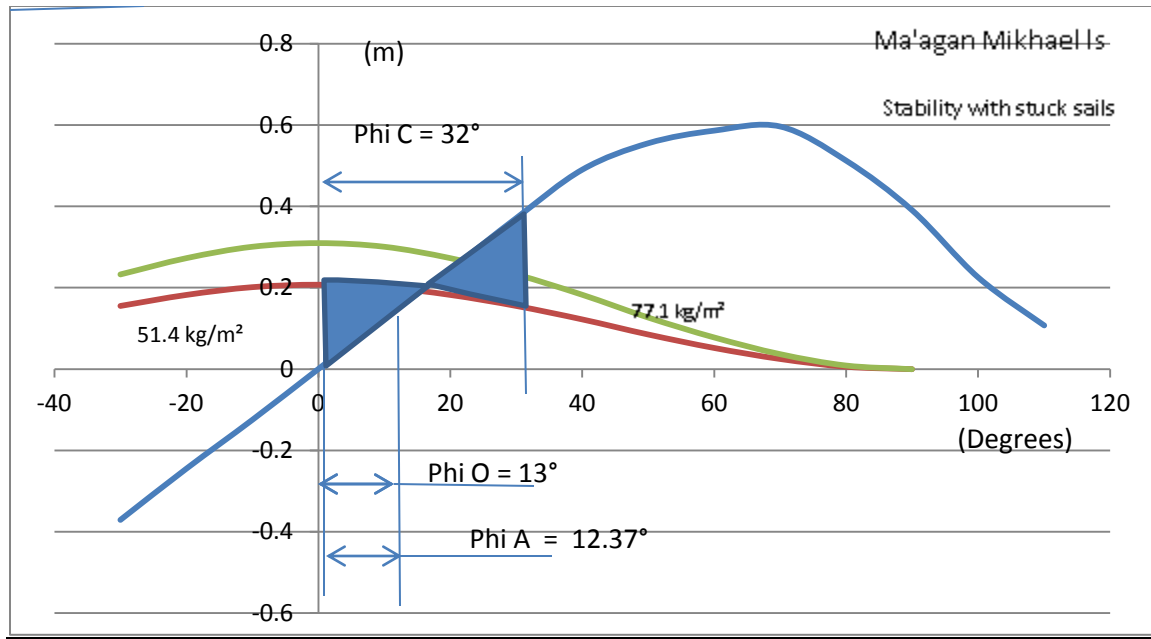
$$\underline{\text{Phi A} = 12.37^\circ}$$

בעמ' 23 ניתן לראות :

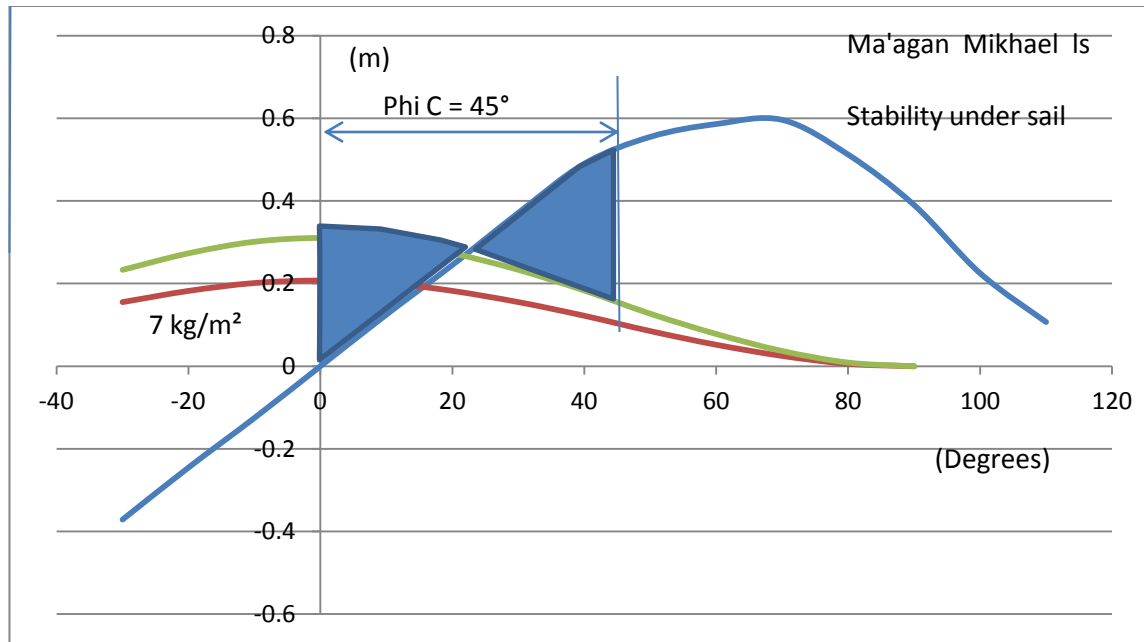
$$\underline{\text{Phi O} = 13^\circ < 20^\circ}$$

Phi C חושב גרפית (עמ' 24) ע"פ הקריטריון של השוואת השטחים ונמצא:

45° עבור מפרש מלא 32° עבור מפרש אסוף בשני המקרים הערכים קטנים מ 50°.



דחי קל במפרש אסוף



דחי קל במפרש מלא

עד כאן עמדנו היטב בקריטריון היציבות לדחי קל

5.5 דחי מלא

5.6 השטח שמתחת עקום היציבות עד 30° לא יהיה פחות מ 0.055 m rad :

$$\underline{A(30) = 0.100 \text{ m rad} > 0.055 \text{ m rad}}$$

5.7 השטח שמתחת לעקום היציבות עד 40° יהיה לפחות 0.09 m rad :

$$\underline{A(40) = 0.171 \text{ m rad} > 0.09 \text{ m rad}}$$

$$\underline{A(40) - A(30) = 0.171 - 0.100 = 0.071 \text{ m rad} > 0.030 \text{ m rad}} \quad 5.8$$

5.9 מתוך טבלת תוצאות החישובים ההידרוסטטיים ניתן לראות את ערכי זרוע היציבות

$$\underline{GZ(30) = 0.382 \text{ m} > 0.2 \text{ m}}$$

5.10 מתוך הטבלה הנ"ל ניתן לראות :

$$\underline{GZ \text{ Max @ } 70^\circ > 25^\circ}$$

5.11 מתוך הטבלה הנ"ל ניתן לראות :

$$\underline{GM(0) = 0.765 \text{ m} > 0.5\text{m}}$$

5.12. חשוב המומנטים בדחי מלא

מומט ההטיה לרוח קבועה במפרשים אסופים ע"פ לחץ רוח של 51.4 kg/m^2 חושב לפי :

$$\text{Moment 1} = 51.4 (\text{Orl} \times \text{Arl} + \text{Otuig} \times \text{Atuig})$$

מומט ההטיה למשב רוח במפרשים אסופים ע"פ לחץ רוח של 77.1 kg/m^2 חושב לפי :

$$\text{Moment 2} = 77.1 (\text{Orl} \times \text{Arl} + \text{Otuig} \times \text{Atuig})$$

מומט ההטיה לרוח קבועה במפרשים מלאים ע"פ לחץ רוח של 7 kg/m^2 חושב לפי :

$$\text{Moment 1} = 7 (\text{Orl} \times \text{Arl} + \text{Osail} \times \text{Asail})$$

מומט ההטיה למשב רוח במפרשים מלאים ע"פ לחץ רוח של 10.5 kg/m^2 חושב לפי :

$$\text{Moment 2} = 10.5 (\text{Orl} \times \text{Arl} + \text{Osail} \times \text{Asail})$$

Orl - שטח פני הספינה כמפרש לרוח מעל קו המים:

$$\underline{\text{Orl} = 15.12 \text{ מ}^2}$$

Arl - המרחק בין מרכז השטח Orl למרכז השטח ה התת - מימי :

$$\underline{\text{Arl} = 1.09 \text{ מ}^2}$$

Otuig - שטח מערך הרמת המפרשים כולל תרנים ע"פ קוטר ממוצע של התרנים +כבלים ומעלנים :

$$\underline{Otuig = 3.00 \text{ מ'}}$$

Atuig - המרחק בין חצי הגובה של התורן לבין מרכז השטח התת מימי :

$$\underline{Atuig = 5.60 \text{ מ'}}$$

Osail - שטח המפרש :

$$\underline{Osail = 60 \text{ מ'}}$$

Asail - המרחק בין מרכז שטח המפרש לחצי השוקע:

$$\underline{Asail = 6.09 \text{ מ'}}$$

המומנטים חושבו ע"פ הנתונים הנ"ל והם:

$$\underline{\text{Moment 1 (51.4) = 1715.1 מ' ק"ג}}$$

$$\underline{\text{Moment 2 (77.1) = 2572.7 מ' ק"ג}}$$

$$\underline{\text{Moment 1 (7) = 2673.8 מ' ק"ג}}$$

$$\underline{\text{Moment 2 (10.5) = 4010.7 מ' ק"ג}}$$

כדי לקבל את עקום זרוע המומנט חולקו המומנטים כל אחד בנפרד בהדחק 12920 ק"ג ונכפלו ב $(\cos \phi)^2$

ϕ	$(\cos \phi)^2$	L(51.4) (m)	L(77.1) (m)	L(7) (m)	L9(10.5) (m)
0	1.000	0.133	0.199	0.207	0.310
10	0.970	0.129	0.193	0.201	0.301
20	0.880	0.117	0.175	0.182	0.273
30	0.750	0.100	0.149	0.155	0.233
40	0.590	0.078	0.117	0.122	0.183
50	0.410	0.055	0.082	0.085	0.127
60	0.250	0.033	0.050	0.052	0.078
70	0.120	0.016	0.024	0.025	0.037
80	0.030	0.004	0.006	0.006	0.009
90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

התוצאות הוספו בצורה גרפית לעקום זרוע היציבות ראה עמודים 31 , 32

5.13. חשוב Phi O

הטית הספינה בנקודה Phi O לא תעלה על 20° :

5.14. חשוב Phi C

Phi A היינו משראת התנודה העצמית עקב גלים והוא יחושב בדרך הבאה:

$$\text{Phi A} = 109 \times K \times C1 \times C2 \times \sqrt{r \times s}$$

$$C1 (B/d = 3.632) = 0.80 \quad C2 (CB = 0.263) = 0.75$$

$$AK = 0.25 \times 10.5 = 2.625 \quad K = 0.7$$

$$r = 0.73 + / - 0.6 \times OG/d$$

$$OG - \text{המרחק בין מרכז הכובד לקו המים} = \text{מ' } 0.052$$

$$r = 0.73 + 0.6 \times 0.052/1.162 = 0.757 \text{ מ'}$$

$$T = 2 \times C \times B / \sqrt{GM} ; c = 0.373 + 0.023 (B/d) - 0.043 (L/100) = 0.373 + 0.023 (4.22/1.162) - 0.043 (15/100) = 0.450$$

$$T = 2 \times 0.450 \times 4.22 / \sqrt{0.765} = 4.34 \text{ ש"}$$

$$s = 0.1$$

$$\text{Phi A} = 109 \times 0.7 \times 0.8 \times 0.75 \times \sqrt{0.757 \times 0.1} = 12.6^\circ$$

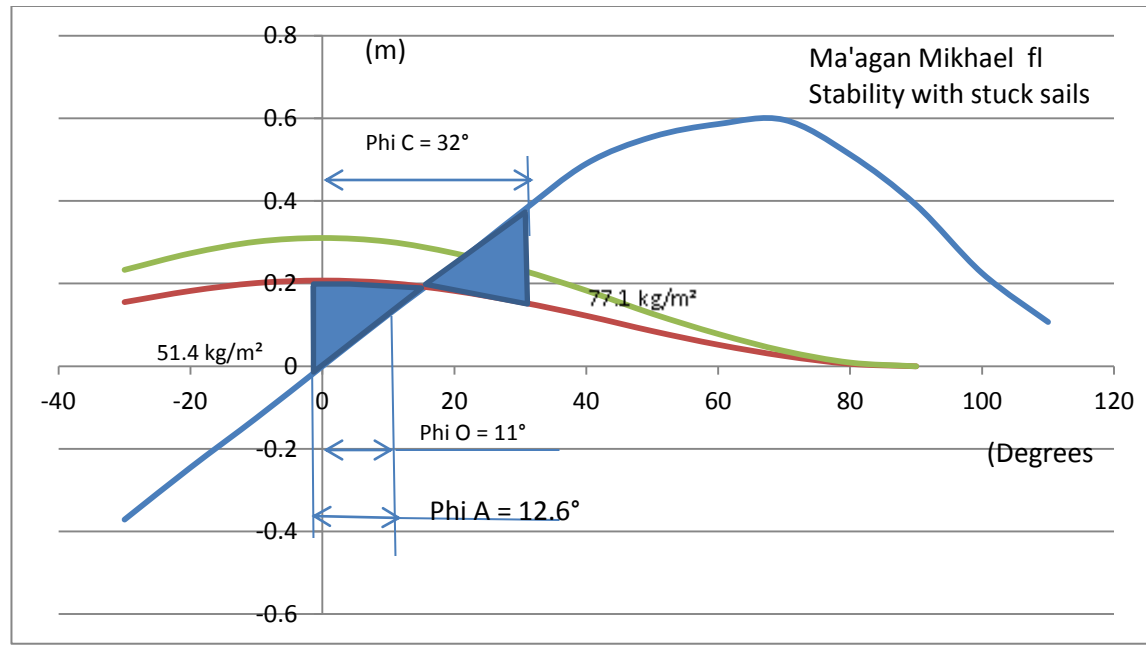
$$\underline{\text{Phi A} = 12.6^\circ}$$

בעמ' 30 ניתן לראות :

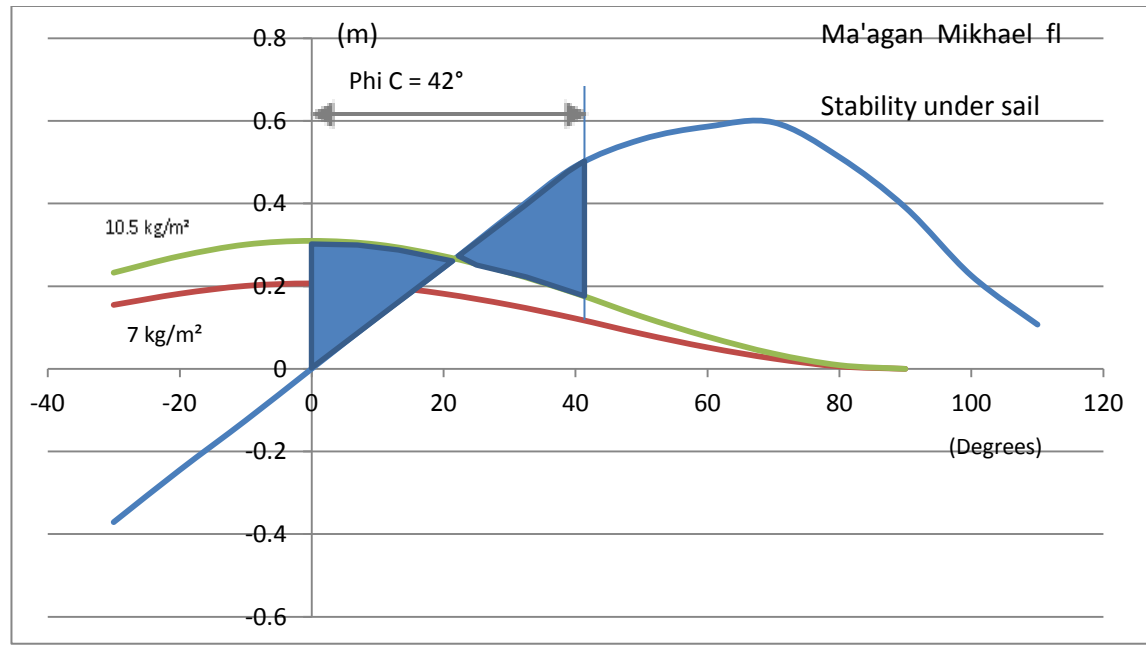
$$\text{Phi O} = 11^\circ < 20^\circ$$

Phi C חושב גרפית(עמ' 32) ע"פ הקריטריון של השוואת השטחים ונמצא:

30° עבור מפרשים מלאים ו 35° עבור מפרשים אסופים בשני המקרים הערכים קטנים מ 50°.



דחי מלא במפרש אסוף



דחי מלא במפרש מלא

עד כאן עמדנו היטב בקריטריון היציבות.

6. מצב ניזוק

הנטל בכלי השייט מורכב ממכילי מים.

משקל הספינה בדחי מלא ללא הנטל יהיה 10.920 טון

נפח הליווח והצלעות עד לדופן חופשית 100 מ"מ יהיה 8.825 מ"ק

$$8.825 \times 1.025 = 9.056 \text{ טון}$$

כדי לאזן את הספינה לדופן חופשית מזערית נדרש :

$$10.920 - 9.056 = 1.864 \text{ טון}$$

$$1.864 / 1.025 = 1.819 \text{ מ"ק}$$

לספינה יוכנסו מתחת לסיפונים באופן קבוע גופי ציפה בנפח 2 מ"ק

7. חישובי חוזק

7.3. חישוב חוזק חתך מרכזי ע"פ מקור מס' 4.

מודולי החתך של הסיפון והקוער Z_p , Z_f בסמ"ק יהיו גדולים יותר מ :

$$Z = 3600 L^2 B / \sigma_u$$

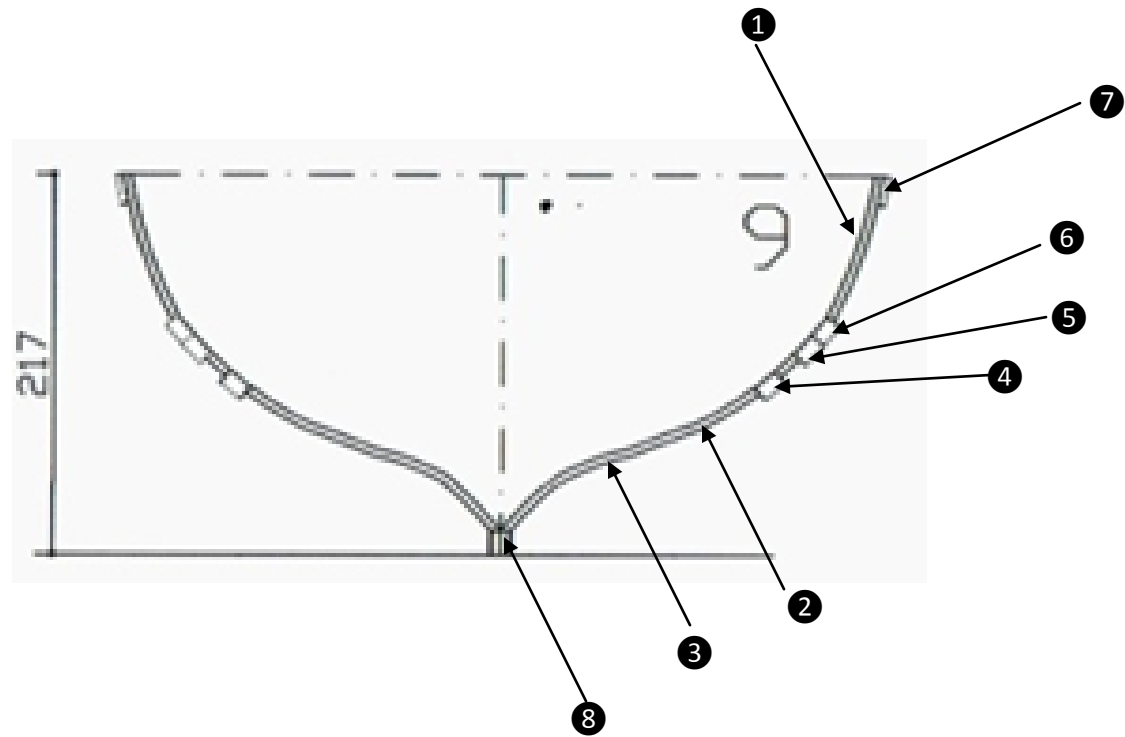
L = אורך קו המים במטרים

B = רוחב מכסימאלי

σ_u = Mpa החוזק הנמוך מבין קריעה / מעיכה ב

$\sigma_u = 40 \text{ Mpa}$ לפי מקור מס' 2

בעמוד הבא ניתן לראות את החלוקה לסיגמנטים של החתך המרכזי לצורך חישוב מומנט האינרציה



הערות:

1. עובי הליווח 42.5 מ"מ.
2. מידות חתך של ארבעת הסרגלים החיצוניים 100 x 80 מ"מ.
3. מידות קורת השדרית 240 x 100 מ"מ.

בעמודים הבאים מוצגים החישובים עבור Z_f , Z_p

i	שטח הסיגמנט בסמ"ר A_{pi}	המרחק מהלזבזת בס"מ γ_{pi}	מודול החתך בסמ"ק Z_{pi}
1	388	46	17848
2	286	144	41184
3	408	168	68544
4	80	120	9600
5	80	101	8080
6	80	91	7280
7	80	4	320
8	240	202	48480
	$\Sigma A_{pi} = 1642$		$\Sigma Z_{pi} = 201336$
		$Z_p = 201336 \text{ cm}^3$	

i	שטח הסיגמנט בסמ"ר Afi	המרחק מהכוער בס"מ Yfi	מודול החתך בסמ"ק Zfi
1	388	168	65184
2	286	82	23452
3	408	68	27744
4	80	96	7680
5	80	120	9600
6	80	130	10400
7	80	264	21120
8	240	10	2400
	$\Sigma Afi = 1642$		$\Sigma Zfi = 167580$
		$Zf = 167580 \text{ cm}^3$	

$$Z = 3600 \text{ L}^2 \text{ B} \cdot 1 / \sigma_u = 3600 \times 15^2 \times 4.22 \times 1 / 40 = \mathbf{85455 \text{ cm}^3}$$

$$85455 < 167580 < 201336$$

חשוב הקו הניטרלי מהשידורית : $Y_n = Z_f / A_f = 201336 / 1642 = 123 \text{ cm}$

$$J = Z_f * Y_n = 201336 \times 123 = 24764328 \text{ cm}^4$$

מומנט האינרציה ע"פ הקרטיון : $J = 0.14 * L * Z * \sigma_u = 0.14 \times 15 \times 85455 \times 40 = 7178220 \text{ cm}^4$

$$7178220 < 24764328$$

$$N = 3.44$$

החתך המרכזי עומד היטב בקרטיוני החוזק

8. סיכום

- 10.1. הספינה הוצגה על כול מרכיבי המבנה.
- 10.2. הספינה הורצה כמודל ממוחשב ונמצאו עקומות היציבות לדחי קל ודחי מלא.
- 10.3. שני מצבי הטעינה נבדקו בחישוב ע"פ הקריטריון ההולנדי ונמצאו מתאימים.
- 10.4. בוצע חישוב ההצפה והוצג פתרון מתאים.
- 10.5. בוצע חישוב חוזק ע"פ קריטריון RINA לחתך המרכזי.

9. רשימת מקורות

THE MA'AGAN MIKHAEL SHIP .1
VOLUME III:
A RECONSTRUCTION OF THE HULL
By ADINA BEN ZEEV, YAACOV KAHANOV, JOHN TRESMAN, MICHAL ARTZY 2009

.2 הספינה המקורית ממעגן מיכאל :
עבודת גמר המוגשת כמילוי חלק מהדרישות לקבלת תואר "מוסמך האוניברסיטה" עדינה בן זאב.
אוניברסיטת חיפה - הפקולטה למדעי הרוח , החוג לציוויליזציות ימיות נובמבר 2004

.1 מילון למונחי הימאות - האקדמיה ללשון העברית 1970

.2 מדריך לאינג'ינר – שלמה אטינגר – הוצאת מסדה ת"א 1975

.3 Register Holland – Rules for seagoing sailing vessels

.4 RINA Rules for the construction and classification

בעמודים הבאים תמונות מייצגות

10. תמונות מייצגות







