

3.2014

## הספינה ממעגן מיכאל

נתונים לאישור הנדסי



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.
5	2. נתוני הספינה.
6	3. סידור כללי
7	4. קווי הגוף .
9	5. חתכים מיצגים.
10	6. חישובים הדרוסטטיים.
18	7. קריטריון היציבות.
38	8. מצב ניזוק.
39	9. חישובי חוזק.
43	10. סיכום.
44	11. סימוכין.

## 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, עיי 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 ארכיאולוגים 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

## 2. נתוני הספינה.

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.

### 3. סידור כללי

#### נתוני הספינה

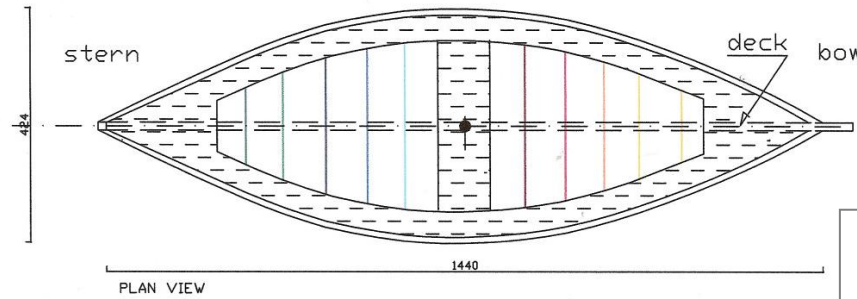
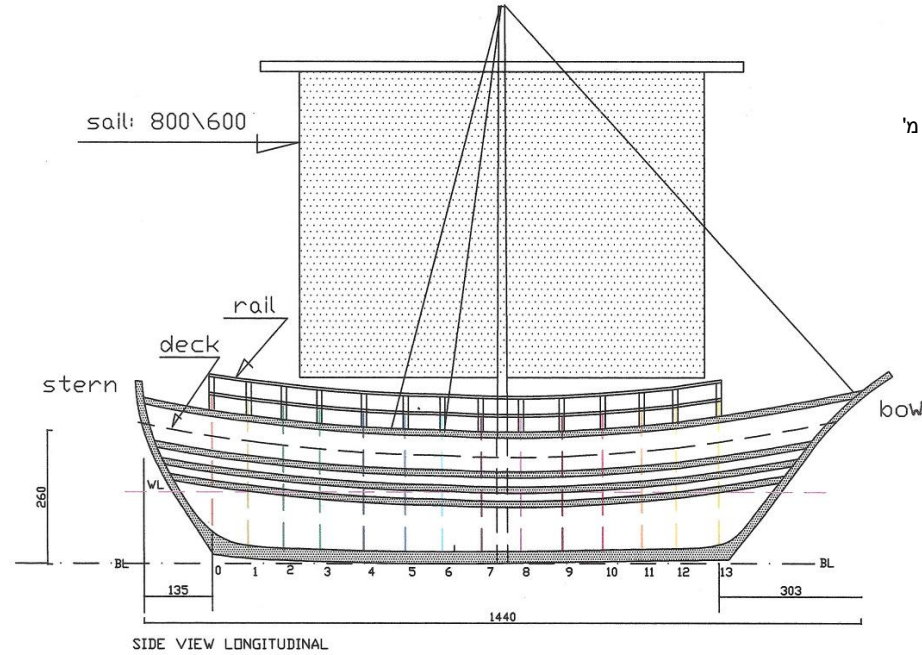
ספינת עץ אורן

אורך כללי 14.400 מ'

רוחב מכסימאלי 4.420 מ'

שוקע מתוכנן 1.036 מ'

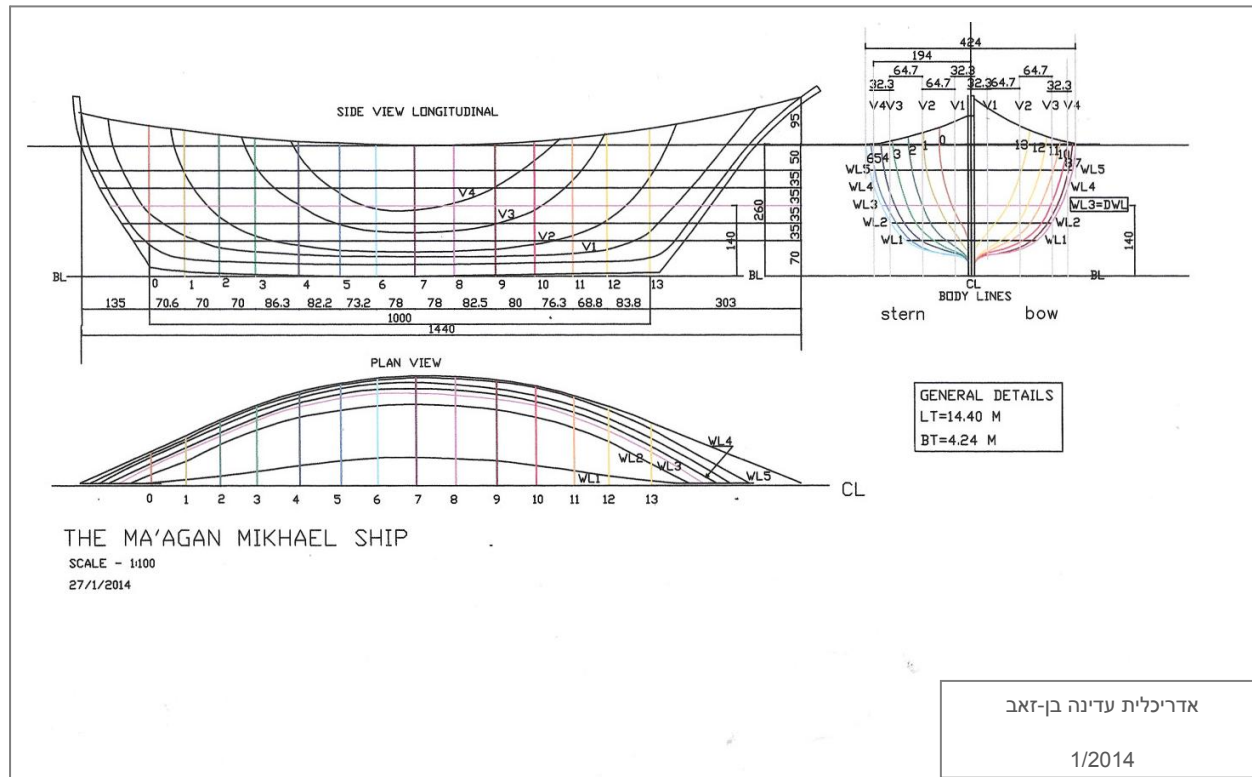
שטח מפרש 48 מ"ר



אדריכלית עדינה בן-זאב

1/2014

קווי הגוף .4



#### טבלאות Offset .4.1

FROM CENTER LINE TO

STATIONS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SHEER	68	99	131	159	184	202	214	218	216	210	197	178	157	124
WL1	6	12	15	28	40	48	54	56	53	49	39	29	20	9
WL2	22	48	83	110	136	148	158	161	158	150	135	114	87	42
WL3	38	69	100	130	155	172	183	183	179	171	158	135	108	66
WL4	44	75	106	135	164	181	191	192	189	180	166	145	119	77
WL5	56	87	119	147	174	191	202	205	200	192	178	158	132	93
WL6	62	93	126	155	181	198	210	214	212	206	194	174	149	112

FROM BASE LINE TO

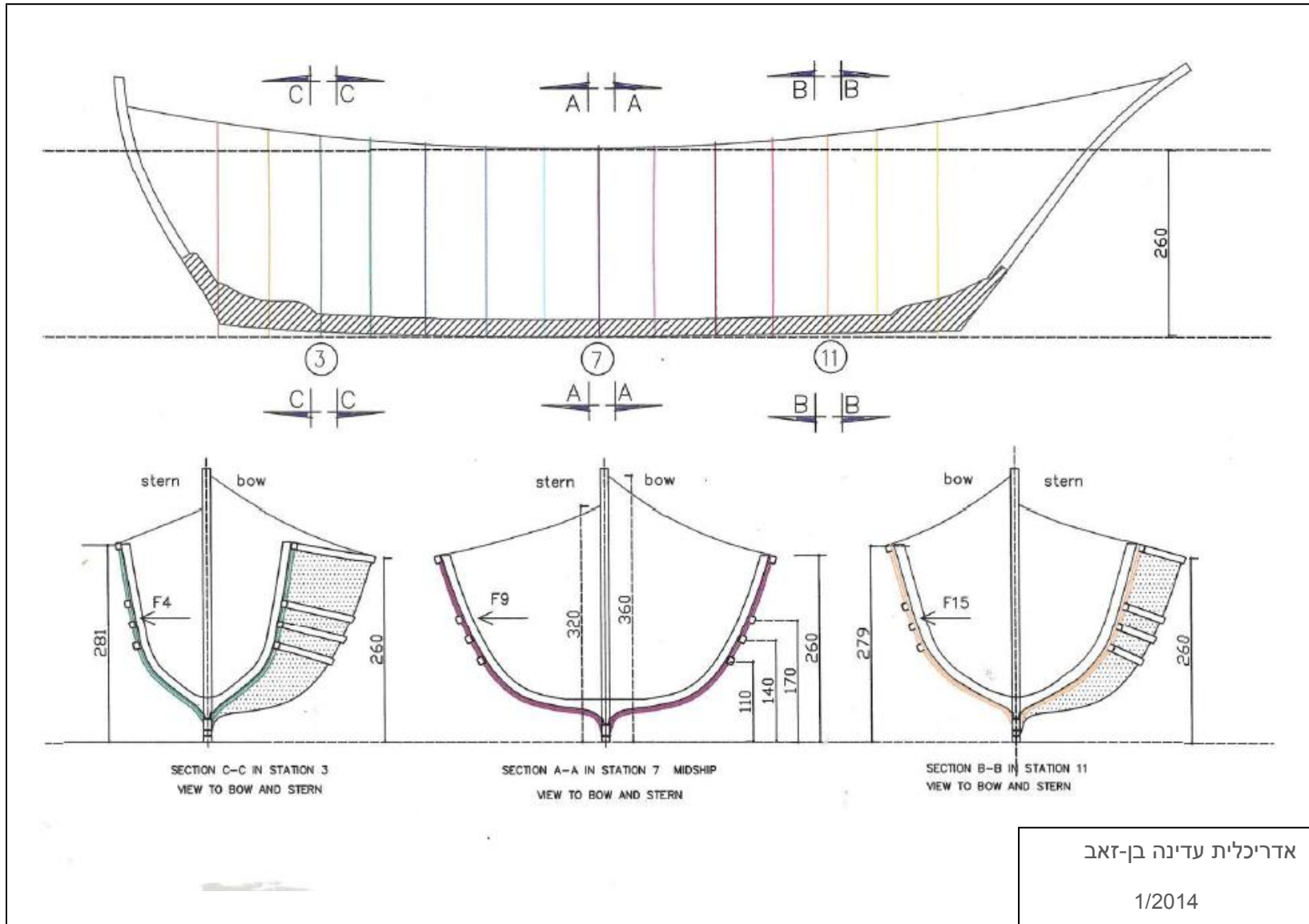
STATIONS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
KEEL	63	35	30	28	25	24	23	23	24	25	27	28	29	36
SHEER	299	291	282	275	268	265	262	260	260	263	267	274	282	293
V1	125	81	57	49	43	40	39	39	39	39	41	45	53	88
V2		205	118	80	62	51	49	48	50	53	63	81	111	196
V3				219	143	103	89	86	90	103	131	190		
V4					241	165	134	131	145	177	229			

אדריכלית עדינה בן-זאב

1/2014



**5. חתכים מייצגים**



## 6. חישובים הדרוסטטים

### 6.1 . 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.

חישוב זה לוקח בתוכו גם את כל שאר מרכיבי העץ של כלי השייט.

לכלי השייט נוספים משקולות נוספים של כגון מסמרי נחושת וחומרי אטימה שלא נלקחים כאן בחשבון.

בגמר הבניה יתבצע ניסוי שקילה והטייה ויקבעו סופית הנתונים.

אורך מייצג לליווח 15.5 מ'

חצי רחב מייצג לליווח 3.5 מ'

עובי מייצג לליווח 0.0425 מ'

הנפח הכללי של הליווח :

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

משקל סגולי של עץ אורן 0.56 ק"ג למ"ק, לאחר תוספת לחות 20% לחות יהיה 0.672 ק"ג למ"ק.

$$W = 4.611 \times 4.611 = 3.1 \text{ טון}$$

## 6.2. חישוב מרכז הכובד של הגוף :

החתך המייצג של הליווח חולק לשלוש קבוצות :

א. בין קו הבסיס לקו המים WL1 מרכז הכובד של הקבוצה 0.35 מ' .

ב. בין קו המים WL1 ל WL4 " " " " 1.05 מ'

ג. בין קו המים WL5 ללזבזת " " " " 2.1 מ'

חישוב מרכז הכובד הכללי מעל קו הבסיס יהיה :

$$C.G = 1.033 ( 0.35 + 1.05 + 2.1 ) / 3.1 = 1.166 \text{ m}$$

6.3. 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 1.35 מ' מעל קו הבסיס.

כדי לאזן את כלי השיט נוסיף שקים עם חלוקי נחל כפי שמקובל בכלי שייט דומים בעולם ע"פ ניסיונו של ד"ר יק כהנוב.

משקל הנטל יהיה 3 טון ובהמשך נראה התאמה ליציבות ולמצב ניזוק.

מקום מרכז הכובד של הנטל יהיה 0.175 מ' מעל קו הבסיס.

6.4. חשוב משקל ומרכז כובד לדחי קל :

$$W_{ls} = 3.100 + 0.150 + 3.000 = 6.250 \text{ טון}$$

$$C.G._{ls} = (3.100 \times 1.166 + 0.150 \times 1.35 + 3.000 \times 0.175) / 6.250 = 0.695 \text{ (מעל קו הבסיס)}$$

מהרצה ממוחשבת של מודל כלי השייט (ראה סעיף 4.7) עבור דחי קל מתקבל שוקע 0.985 מ' ולכן מיקום מרכז הכובד ביחס לקו המים יהיה :

$$V.C.G = 0.985 - 0.695 = 0.290 \text{ (מתחת לקו המים)}$$

6.5. חשוב המשקל ומרכז הכובד לדחי מלא :

$$W_{fl} = 3.100 + 1.125 + 3 = 7.225 \text{ טון}$$

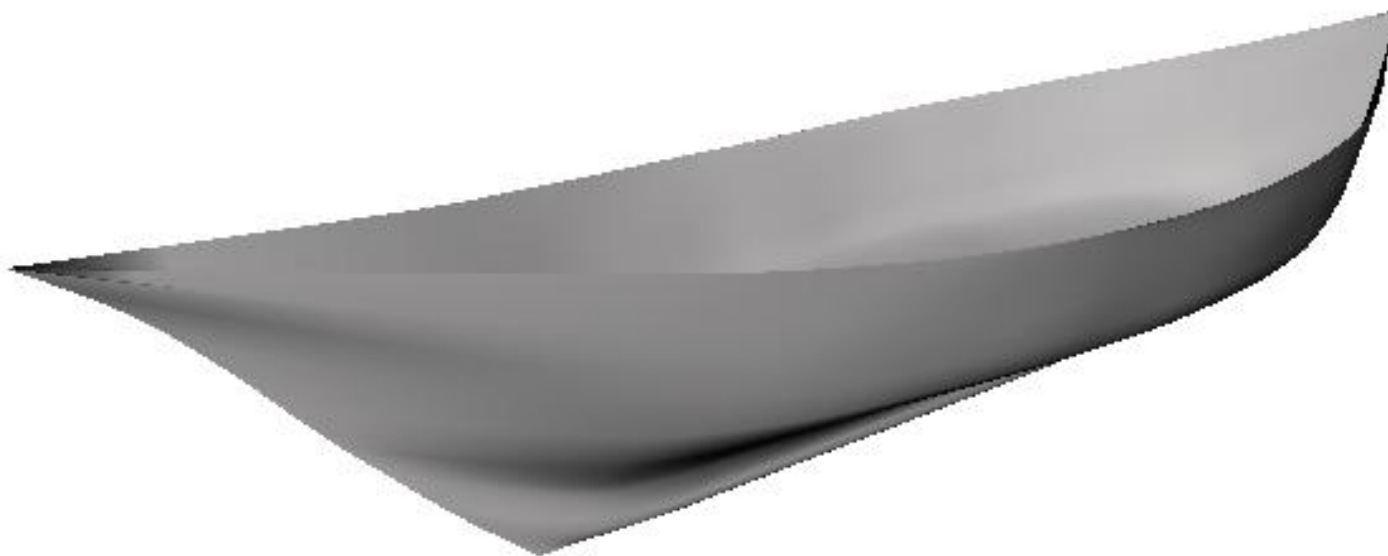
$$C.G._{fl} = (3.100 \times 1.166 + 1.125 \times 1.35 + 3.000 \times 0.175) / 7.225 = 0.783 \text{ (מעל קו הבסיס)}$$

מהרצה ממוחשבת של מודל כלי השייט (ראה סעי 4.7) עבור דחי מלא מתקבל שוקע 1.036 מ' ולכן מיקום מרכז הכובד ביחס לקו המים יהיה :

$$V.C.G_{ls} = 1.036 - 0.783 = 0.253 \text{ (מתחת לקו המים)}$$

6.6. נתוני קווי הגוף הורצו בתוכנת Prolines 7 PRO

להלן המודל שנקלט :

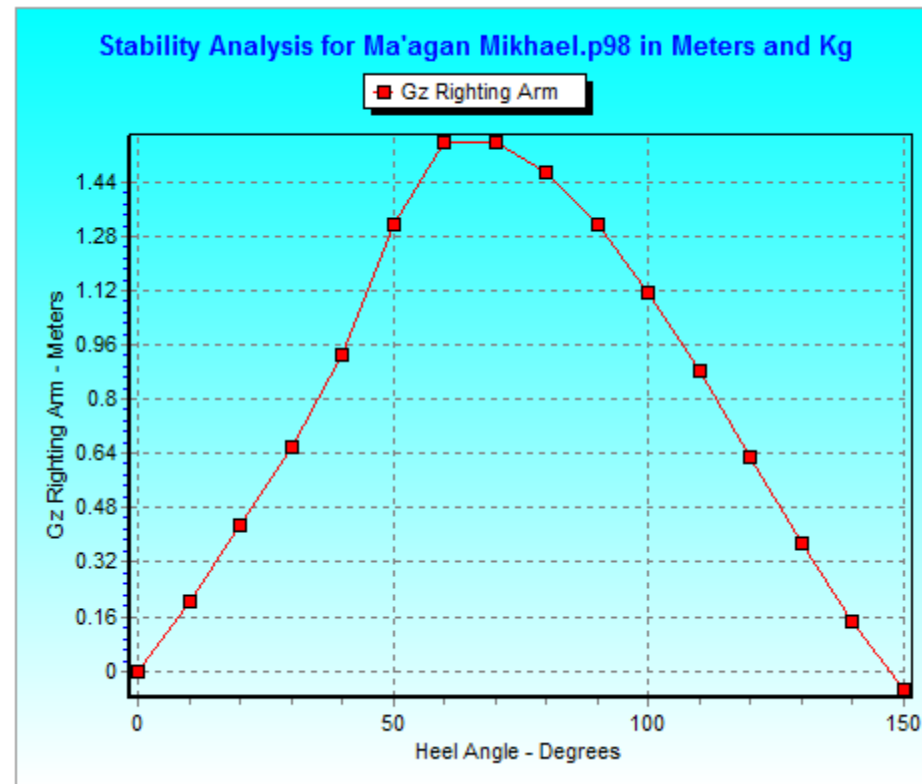


**6.7. להלן נתוני הדרוסטטיקה דחי קל :**

PROLINES V7 Hydrostatics Analysis For...G:\aba\naval\MM\Ma'agan Mikhael.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	6249.7	0.00	11.463	0.985	2.479	18.394	29.234	0.626	0.218	0.647	6.615	-0.257	0.000	6.595	0.000	-0.290	6.615
10.00	6259.3	0.00	11.422	0.942	2.652	18.795	29.587	0.611	0.214	0.620	6.613	-0.242	0.156	6.604	-0.050	-0.258	6.615
20.00	6249.7	0.00	11.307	0.828	2.718	18.866	29.078	0.582	0.239	0.614	6.616	-0.213	0.329	6.616	-0.099	-0.173	6.615
30.00	6249.7	0.00	11.121	0.661	2.855	19.374	28.928	0.547	0.291	0.610	6.628	-0.188	0.514	6.631	-0.145	-0.054	6.615
40.00	6249.8	0.00	10.829	0.568	3.180	20.918	28.924	0.511	0.312	0.608	6.648	-0.177	0.746	6.669	-0.186	0.095	6.615
50.00	6254.7	0.00	10.354	0.669	3.194	23.332	27.721	0.486	0.276	0.706	6.683	-0.196	1.091	6.717	-0.222	0.270	6.615
60.00	6261.1	0.00	7.888	0.722	3.141	16.036	20.488	0.639	0.341	0.647	6.715	-0.242	1.305	6.736	-0.251	0.482	6.615
70.00	6246.0	0.00	7.646	0.730	2.109	13.851	19.464	0.669	0.518	0.859	6.734	-0.270	1.285	6.715	-0.273	0.728	6.615
80.00	6247.9	0.00	8.115	0.840	1.876	12.871	19.971	0.646	0.477	0.846	6.760	-0.295	1.183	6.820	-0.286	0.968	6.615
90.00	6249.6	0.00	8.935	0.979	1.751	12.436	20.248	0.604	0.398	0.795	6.784	-0.314	1.026	6.796	-0.290	1.192	6.615
100.00	6249.8	0.00	9.793	1.078	1.686	12.273	20.765	0.572	0.343	0.743	6.812	-0.326	0.830	6.820	-0.286	1.392	6.615
110.00	6249.8	0.00	10.799	1.132	1.665	12.471	21.269	0.544	0.299	0.694	6.850	-0.331	0.609	6.863	-0.273	1.561	6.615
120.00	6249.7	0.00	12.110	1.138	1.670	13.053	22.222	0.518	0.265	0.645	6.907	-0.325	0.378	6.941	-0.251	1.698	6.615
130.00	6249.6	0.00	13.846	1.087	1.677	14.111	23.487	0.496	0.241	0.608	7.010	-0.307	0.154	7.081	-0.222	1.803	6.615
140.00	6249.7	0.00	14.107	0.977	1.666	15.432	25.564	0.549	0.265	0.657	7.149	-0.274	-0.039	7.044	-0.186	1.879	6.615
150.00	6253.5	0.00	13.814	0.816	1.656	17.298	27.377	0.662	0.327	0.756	7.256	-0.237	-0.200	6.986	-0.145	1.922	6.615
Ang	Bmt	Gmt	Bml	Gml	Gz												
0.000	1.099	1.132	18.103	18.136	0.000												
10.000	1.202	1.217	18.068	18.083	0.207												
20.000	1.243	1.203	17.701	17.661	0.428												
30.000	1.397	1.263	17.494	17.360	0.659												
40.000	1.871	1.598	17.793	17.520	0.932												
50.000	2.686	2.220	19.245	18.778	1.313												
60.000	1.058	0.335	11.388	10.664	1.556												
70.000	0.698	-0.299	10.214	9.216	1.557												
80.000	0.509	-0.754	10.048	8.785	1.469												
90.000	0.407	-1.100	10.428	8.922	1.316												
100.000	0.356	-1.362	11.128	9.409	1.116												
110.000	0.335	-1.557	12.576	10.684	0.882												
120.000	0.333	-1.690	15.325	13.302	0.629												
130.000	0.339	-1.771	20.875	18.766	0.377												
140.000	0.367	-1.786	27.465	25.311	0.148												
150.000	0.460	-1.699	34.761	32.602	-0.055												



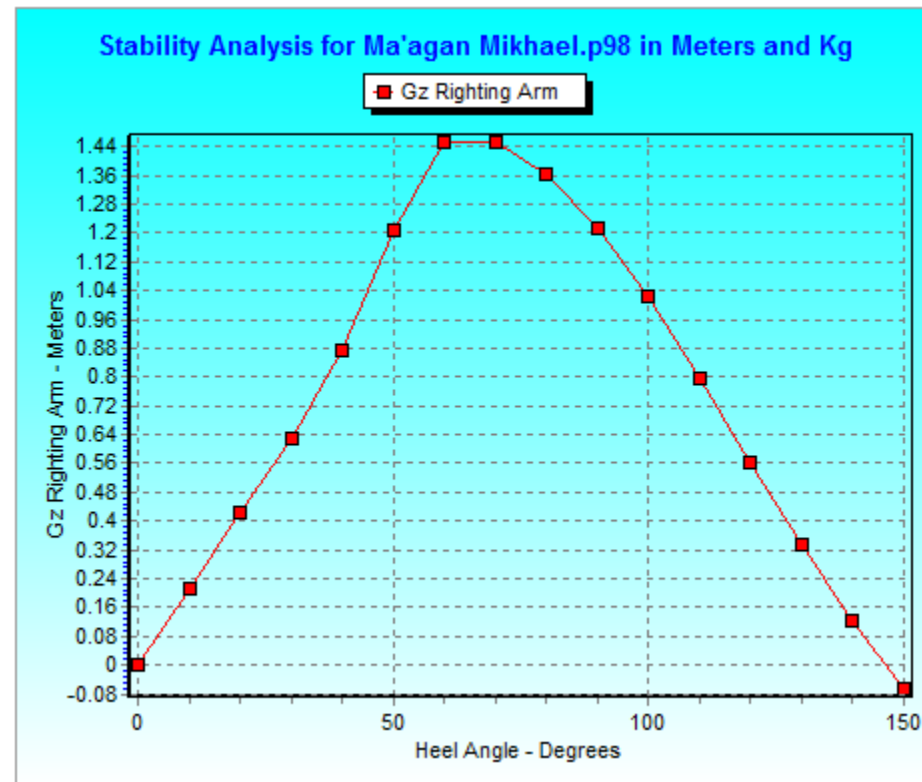
**6.9 נתוני הדרוסטיקה דחי מלא:**

PROLINES V7 Hydrostatics Analysis For...G:\aba\naval\MM\Ma'agan Mikhael.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	7254.8	0.00	11.537	1.036	2.684	20.052	31.122	0.625	0.221	0.648	6.611	-0.269	0.000	6.591	0.000	-0.253	6.611
10.00	7263.5	0.00	11.497	0.993	2.776	20.077	31.167	0.612	0.224	0.629	6.611	-0.256	0.168	6.604	-0.044	-0.222	6.611
20.00	7254.8	0.00	11.387	0.879	2.799	19.805	30.931	0.586	0.253	0.621	6.616	-0.231	0.335	6.616	-0.087	-0.141	6.611
30.00	7254.9	0.00	11.209	0.710	2.928	20.239	30.598	0.555	0.304	0.617	6.627	-0.208	0.504	6.629	-0.127	-0.027	6.611
40.00	7254.9	0.00	10.924	0.614	3.258	21.740	30.292	0.522	0.324	0.611	6.650	-0.196	0.715	6.671	-0.163	0.116	6.611
50.00	7256.5	0.00	10.462	0.712	3.146	23.503	29.940	0.503	0.302	0.714	6.687	-0.209	1.014	6.725	-0.194	0.284	6.611
60.00	7258.5	0.00	8.160	0.780	3.126	17.198	22.543	0.645	0.356	0.674	6.719	-0.263	1.234	6.735	-0.219	0.468	6.611
70.00	7251.6	0.00	7.972	0.796	2.153	14.815	21.593	0.671	0.518	0.863	6.737	-0.295	1.213	6.713	-0.238	0.691	6.611
80.00	7253.1	0.00	8.454	0.912	1.908	13.732	21.592	0.648	0.481	0.851	6.762	-0.321	1.113	6.825	-0.249	0.911	6.611
90.00	7254.6	0.00	9.291	1.054	1.778	13.298	21.894	0.607	0.406	0.805	6.784	-0.341	0.961	6.799	-0.253	1.117	6.611
100.00	7254.8	0.00	10.189	1.154	1.717	13.167	22.251	0.573	0.350	0.753	6.813	-0.353	0.772	6.825	-0.249	1.300	6.611
110.00	7254.8	0.00	11.248	1.208	1.702	13.440	23.159	0.543	0.306	0.702	6.852	-0.355	0.562	6.869	-0.238	1.456	6.611
120.00	7254.7	0.00	12.637	1.209	1.719	14.169	24.271	0.515	0.269	0.652	6.912	-0.347	0.344	6.950	-0.219	1.582	6.611
130.00	7254.7	0.00	14.011	1.153	1.747	15.346	26.045	0.505	0.251	0.627	7.019	-0.326	0.139	7.050	-0.194	1.680	6.611
140.00	7254.9	0.00	14.003	1.038	1.757	16.681	27.667	0.569	0.277	0.678	7.128	-0.293	-0.040	6.994	-0.163	1.750	6.611
150.00	7259.1	0.00	13.740	0.871	1.766	18.486	29.693	0.678	0.335	0.762	7.209	-0.255	-0.192	6.949	-0.126	1.790	6.611
Ang	Bmt	Gmt	Bml	Gml	Gz												
0.000	1.209	1.193	17.241	17.226	0.000												
10.000	1.228	1.195	17.050	17.016	0.212												
20.000	1.200	1.111	16.503	16.413	0.421												
30.000	1.326	1.145	16.237	16.056	0.631												
40.000	1.748	1.436	16.395	16.083	0.877												
50.000	2.293	1.800	17.319	16.826	1.208												
60.000	1.045	0.314	11.362	10.632	1.453												
70.000	0.677	-0.309	10.265	9.279	1.451												
80.000	0.490	-0.743	10.047	8.815	1.362												
90.000	0.394	-1.063	10.480	9.023	1.214												
100.000	0.348	-1.304	11.221	9.568	1.022												
110.000	0.331	-1.479	12.733	10.922	0.799												
120.000	0.336	-1.592	15.613	13.684	0.563												
130.000	0.352	-1.654	20.796	18.791	0.333												
140.000	0.389	-1.654	26.225	24.181	0.122												
150.000	0.487	-1.558	31.391	29.346	-0.066												

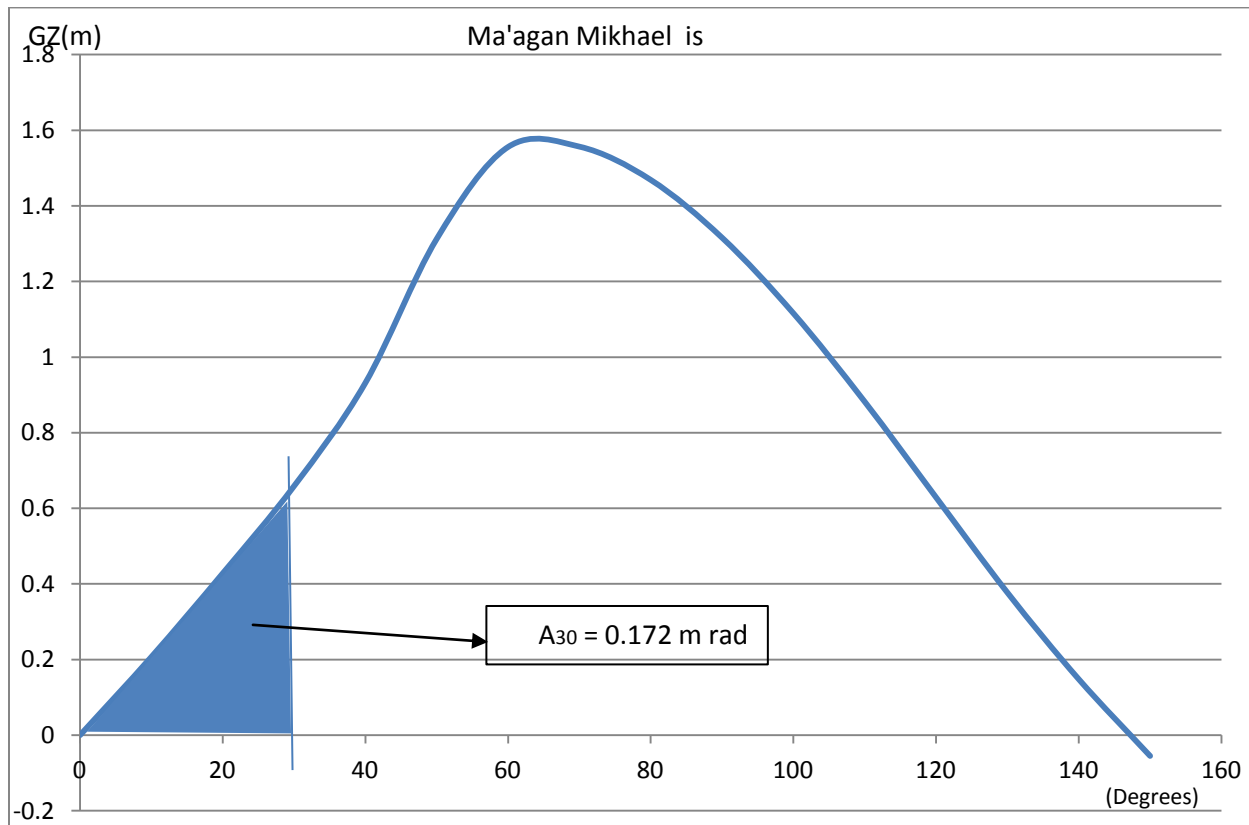




7. קריטריון היציבות ע"פ מקור מס' 3

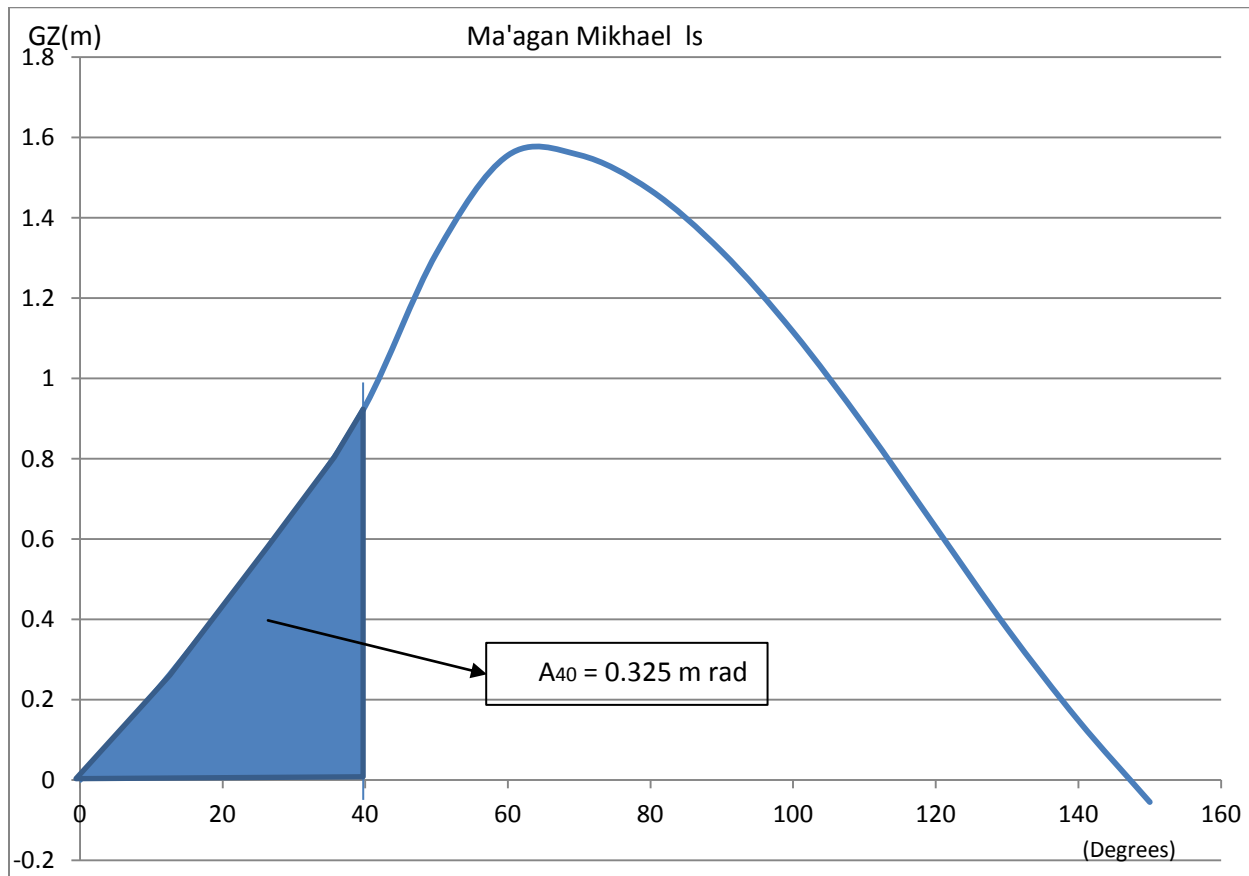
דחי קל

7.1. השטח שמתחת עקום היציבות עד  $30^\circ$  לא יהיה פחות מ  $0.055 \text{ m rad}$  :



$A(30) = 0.172 \text{ m rad} > 0.055 \text{ m rad}$

7.2. השטח שמתחת לעקום היציבות עד  $40^\circ$  יהיה לפחות  $0.09 \text{ m rad}$  :



$$\underline{A(40) = 0.352 \text{ m rad} > 0.09 \text{ m rad}}$$

$$\underline{A(40) - A(30) = 0.352 - 0.172 = 0.180 \text{ m rad} > 0.030 \text{ m rad}}$$

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

$$\underline{GZ(30) = 0.659 \text{ m} > 0.2 \text{ m}}$$

7.4 מתוך הטבלה הנ"ל ניתן לראות :

$$\underline{GZ \text{ Max @ } 60^\circ > 25^\circ}$$

7.5 מתוך הטבלה הנ"ל ניתן לראות :

$$\underline{GM(0) = 1.132 \text{ m} > 0.5 \text{ m}}$$

#### 7.5 חשב המומנטים

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

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

מומט ההטיה למשב רוח במפרשים אסופים ע"פ לחץ רוח של  $77.1 \text{ kg/m}^2$  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  $7 \text{ kg/m}^2$  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  $10.5 \text{ kg/m}^2$  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:

$$\underline{\text{Orl} = 18.75 \text{ מ}^2}$$

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

$$\underline{\text{Arl} = 1.30 \text{ מ}^2}$$

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

$$\underline{\text{Otuig} = 3.00 \text{ מ}^2}$$

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

$$\underline{\text{Atuig} = 4.85 \text{ מ}^2}$$

Osail - שטח המפרש :

מ' 48 = Osail

Asail - המרחק בין מרכז שטח המפרש לחצי השוקע:

מ' 4.6 = Asail

המומנטים חושבו ע"פ הנתונים הנ"ל והם:

ק"ג מ' 1434.06 = Moment 1 (51.4)

ק"ג מ' 2151.10 = Moment 2 (77.1)

ק"ג מ' 1716.23 = Moment 1 (7)

ק"ג מ' 2574.34 = Moment 2 (10.5)

כדי לקבל את עקום זרוע המומנט חולקו המומנטים כל אחד בנפרד בהדחק 6250 ק"ג ונפלו ב  $(\cos \phi)^2$

$\phi$	$(\cos \phi)^2$	L(51.4) (m)	L(77.1) (m)	L(7) (m)	L9(10.5) (m)
0	1	0.229	0.344	0.275	0.412
10	0.97	0,222	0.334	0.266	0.400
20	0.88	0.202	0.303	0.242	0.363
30	0.75	0.172	0.258	0.206	0.309
40	0.59	0.135	0.203	0.162	0.243
50	0.41	0.094	0.141	0.113	0.169
60	0.25	0.057	0.086	0.069	0.103
70	0.12	0.027	0.041	0.033	0.049
80	0.03	0.007	0.010	0.008	0.012
90	0	0	0	0	0

התוצאות הוספו בצורה גרפית לעקום זרוע היציבות ראה עמ' 26-27

7.6. חשוב Phi O

הטית הספינה בנקודה Phi O לא תעלה על 20° :

ניתן לראות בעמוד .... את ערכו של Phi O = 10° > 20°

7.7. חשוב Phi C

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

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

$$C1 (B/d = 4.488) = 0.80 \quad C2 (CB = 0.218) = 0.75$$

$$AK = 0.25 \times 10.5 = 2.625 \quad K = 1$$

$$r = 0.73 \pm 0.6 \times OG/d$$

$$OG - \text{המרחק בין מרכז הכובד לקו המים} = 0.290 \text{ מ'}$$

$$r = 0.73 - 0.6 \times 0.290/0.985 = 0.553 \text{ מ'}$$



$$T = 2 \times C \times B / \sqrt{GM} ; c = 0.373 + 0.023 (B/d) - 0.043 (L/100) = 0.373 + 0.023 (4.42/0.985) - 0.043 (10.5/100) = 0.471$$

$$T = 2 \times 0.471 \times 4.42 / \sqrt{1.132} = 4.43 \text{ שניה}$$

$$s = 0.1$$

$$\text{Phi A} = 109 \times 1 \times 0.8 \times 0.75 \times \sqrt{0.553 \times 0.1} = 15.39^\circ$$

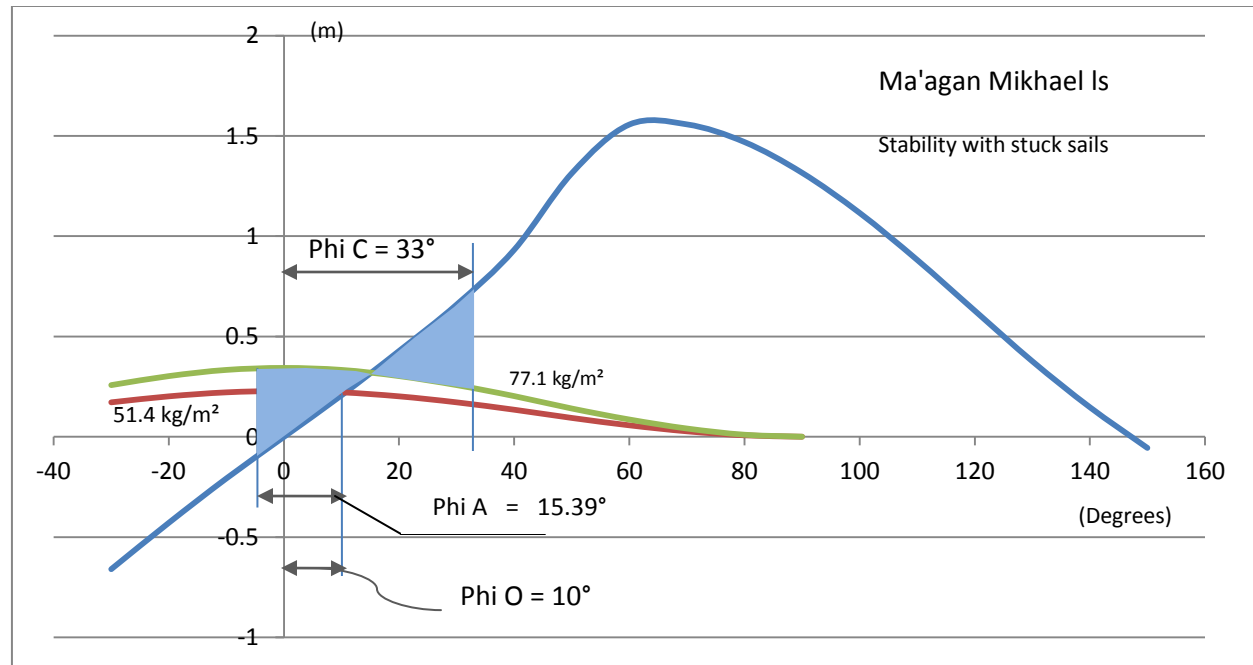
$$\text{Phi A} = 15.39^\circ$$

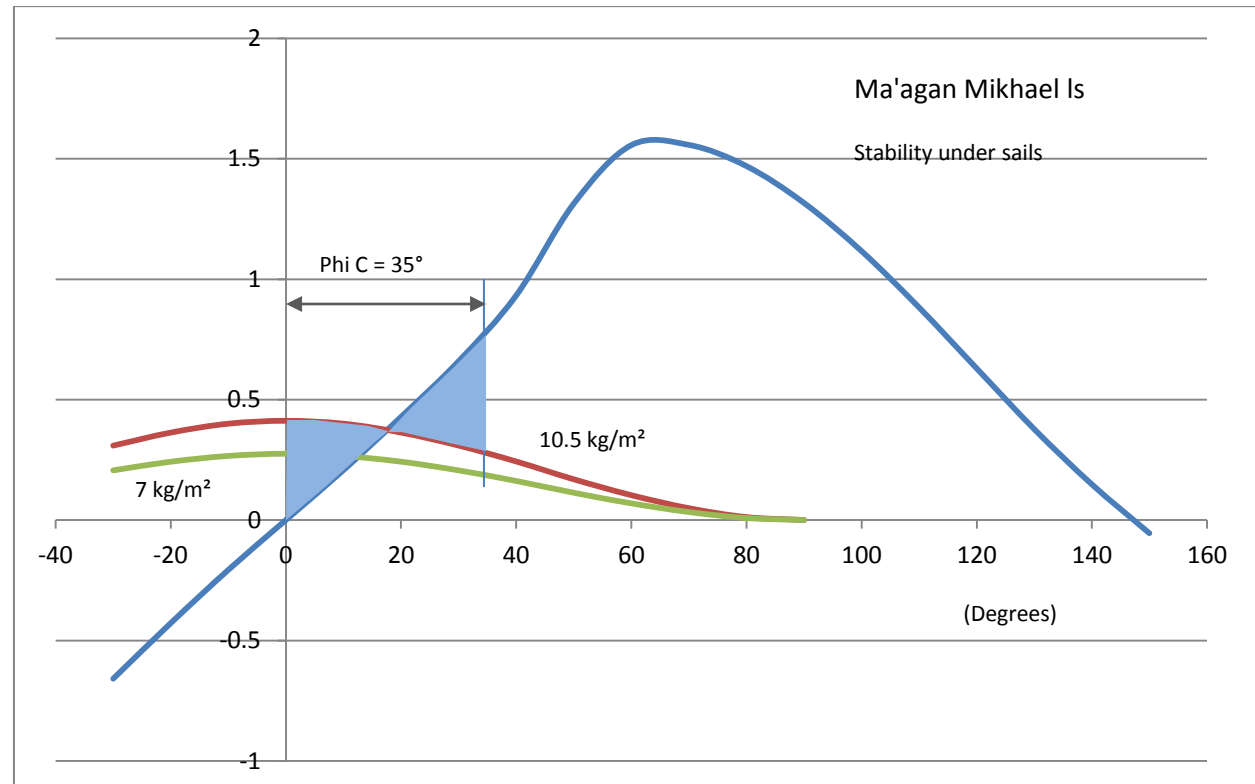
**בעמ' 26-27 ניתן לראות :**

$$\text{Phi O} = 10^\circ < 20^\circ$$

Phi C חושב גרפית ע"פ הקריטריון של השוואת השטחים ונמצא:

**33° עבור מפרשים מלאים ו 35° עבור מפרשים אסופים בשני המקרים הערכים קטנים מ 50°.**

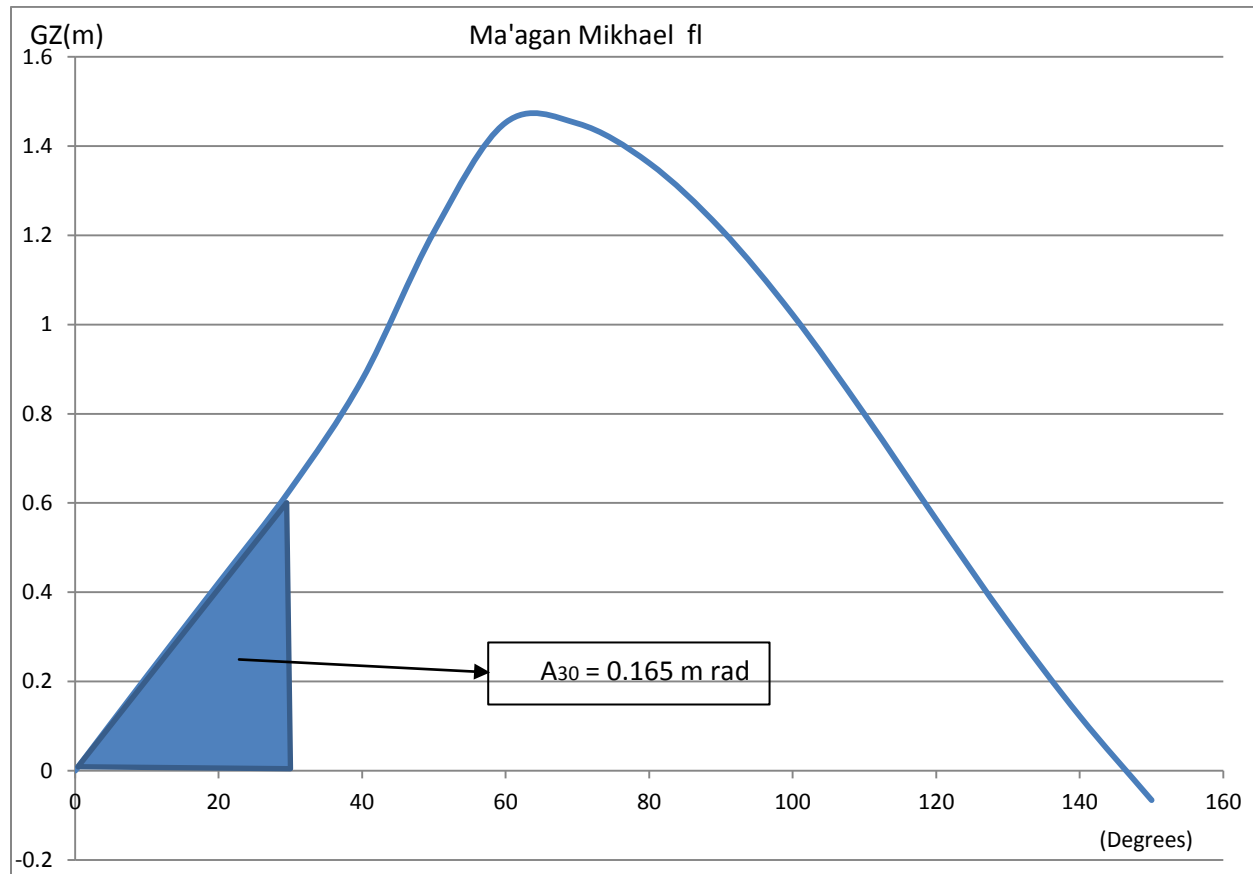




עד כאן עמדנו היטב בקריטריון היציבות לדחי קל

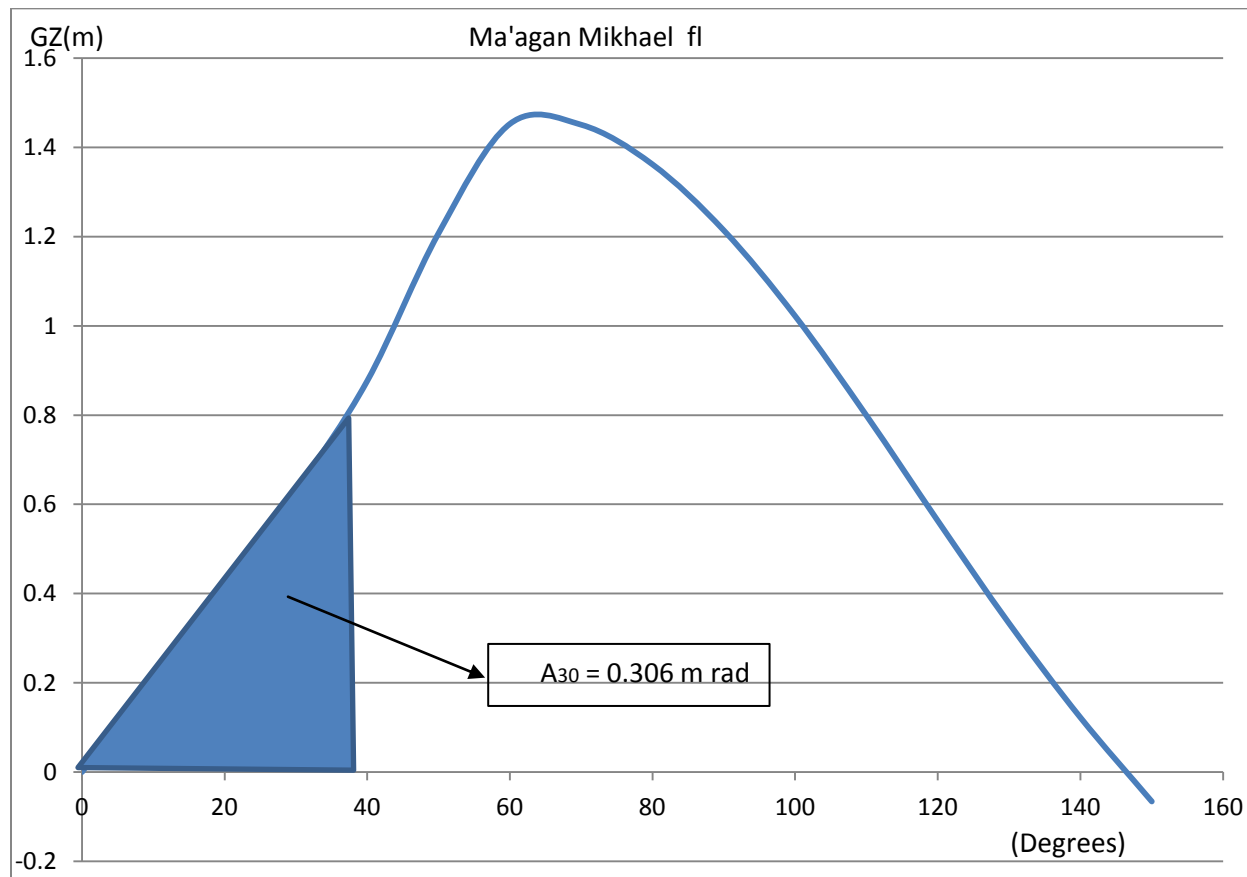
דחי מלא

7.8 . השטח שמתחת עקום היציבות עד  $30^\circ$  לא יהיה פחות מ  $0.055 \text{ m rad}$  :



$A(30) = 0.165 \text{ m rad} > 0.055 \text{ m rad}$

7.9 השטח שמתחת לעקום היציבות עד  $40^\circ$  יהיה לפחות  $0.09 \text{ m rad}$  :



$A(40) = 0.306 \text{ m rad} > 0.09 \text{ m rad}$

$$\underline{A(40) - A(30) = 0.306 - 0.165 = 0.141 \text{ m rad} > 0.030 \text{ m rad}} \quad .7.10$$

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

$$\underline{GZ(30) = 0.631 \text{ m} > 0.2 \text{ m}}$$

.7.12 מתוך הטבלה הנ"ל ניתן לראות :

$$\underline{GZ \text{ Max @ } 60^\circ > 25^\circ}$$

.7.13 מתוך הטבלה הנ"ל ניתן לראות :

$$\underline{GM(0) = 1.209 \text{ m} > 0.5 \text{ m}}$$

.7.14 חשוב המומנטים

מומט ההטיה לרוח קבועה במפרשים אסופים ע"פ לחץ רוח של  $51.4 \text{ kg/m}^2$  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  $77.1 \text{ kg/m}^2$  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  $7 \text{ kg/m}^2$  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  $10.5 \text{ kg/m}^2$  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:

$$\underline{\text{Orl} = 18.21 \text{ מ}^2}$$

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

$$\underline{\text{Arl} = 1.29 \text{ מ}^2}$$

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

$$\underline{\text{Otuig} = 3.00 \text{ מ}^2}$$

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

$$\underline{\text{Atuig} = 4.85 \text{ מ}^2}$$

Osail - שטח המפרש :

$$\underline{\text{Osail} = 48 \text{ מ}^2}$$

Asail - המרחק בין מרכז שטח המפרש לחצי השוקע:

$$\underline{\text{Asail} = 4.6 \text{ מ'}}$$

המומנטים חושבו ע"פ הנתונים הנ"ל והם:

$$\underline{\text{Moment 1 (51.4)} = 1955.3 \text{ מ' ק"ג}}$$

$$\underline{\text{Moment 2 (77.1)} = 2932.95 \text{ מ' ק"ג}}$$

$$\underline{\text{Moment 1 (7)} = 1710.04 \text{ מ' ק"ג}}$$

$$\underline{\text{Moment 2 (10.5)} = 2565.05 \text{ מ' ק"ג}}$$

כדי לקבל את עקום זרוע המומנט חולקו המומנטים כל אחד בנפרד בהדחק 7255 ק"ג ונכפלו ב  $(\cos \phi)^2$



בעמוד הבא מוצגת טבלת התוצאות:

$\phi$	$(\cos \phi)^2$	L(51.4) (m)	L(77.1) (m)	L(7) (m)	L(10.5) (m)
0	1	0.270	0.404	0.236	0.354
10	0.97	0,262	0.392	0.229	0.343
20	0.88	0.238	0.356	0.208	0.313
30	0.75	0.203	0.303	0.177	0.266
40	0.59	0.159	0.238	0.139	0.208
50	0.41	0.111	0.166	0.098	0.146
60	0.25	0.068	0.101	0.059	0.089
70	0.12	0.032	0.048	0.028	0.041
80	0.03	0.008	0.012	0.007	0.011
90	0	0	0	0	0

התוצאות הוספו בצורה גרפית לעקום זרוע היציבות ראה עמ' 36-37

חשוב Phi O .7.15

הטית הספינה בנקודה Phi O לא תעלה על 20° :

ניתן לראות את ערכו של Phi O = 13° > 20°

חשוב Phi C .7.16

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

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

$$C1 (B/d = 4.266) = 0.80 \quad C2 (CB = 0.221) = 0.75$$

$$AK = 0.25 \times 10.5 = 2.625 \quad K = 1$$

$$r = 0.73 \pm 0.6 \times OG/d$$

OG - המרחק בין מרכז הכובד לקו המים = מ' 0.253 -

$$r = 0.73 - 0.6 \times 0.253/0.985 = 0.576 \text{ מ'}$$

$$T = 2 \times C \times B / \sqrt{GM} ; c = 0.373 + 0.023 (B/d) - 0.043 (L/100) = 0.373 + 0.023 (4.42/1.036) - 0.043 (10.5/100) = 0.467$$

$$T = 2 \times 0.467 \times 4.42 / \sqrt{1.193} = 3.78 \text{ שנייה}$$

$$s = 0.1$$

$$\text{Phi A} = 109 \times 1 \times 0.8 \times 0.75 \times \sqrt{0.576 \times 0.1} = 15.7^\circ$$

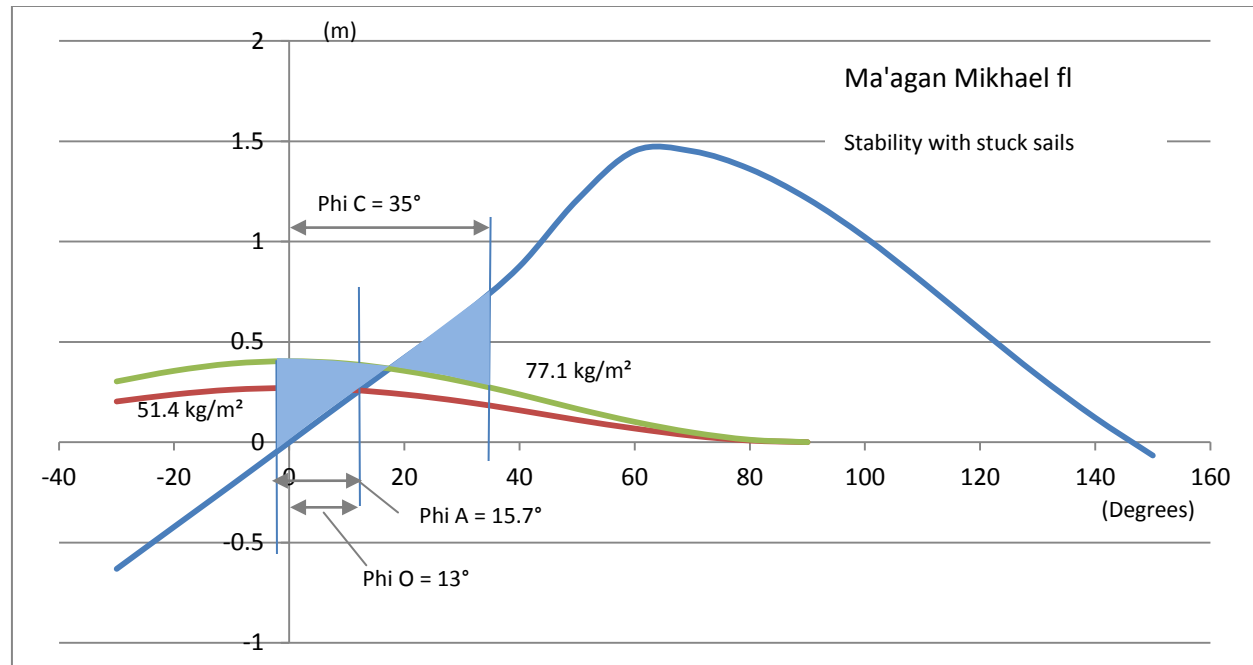
$$\text{Phi A} = 15.7^\circ$$

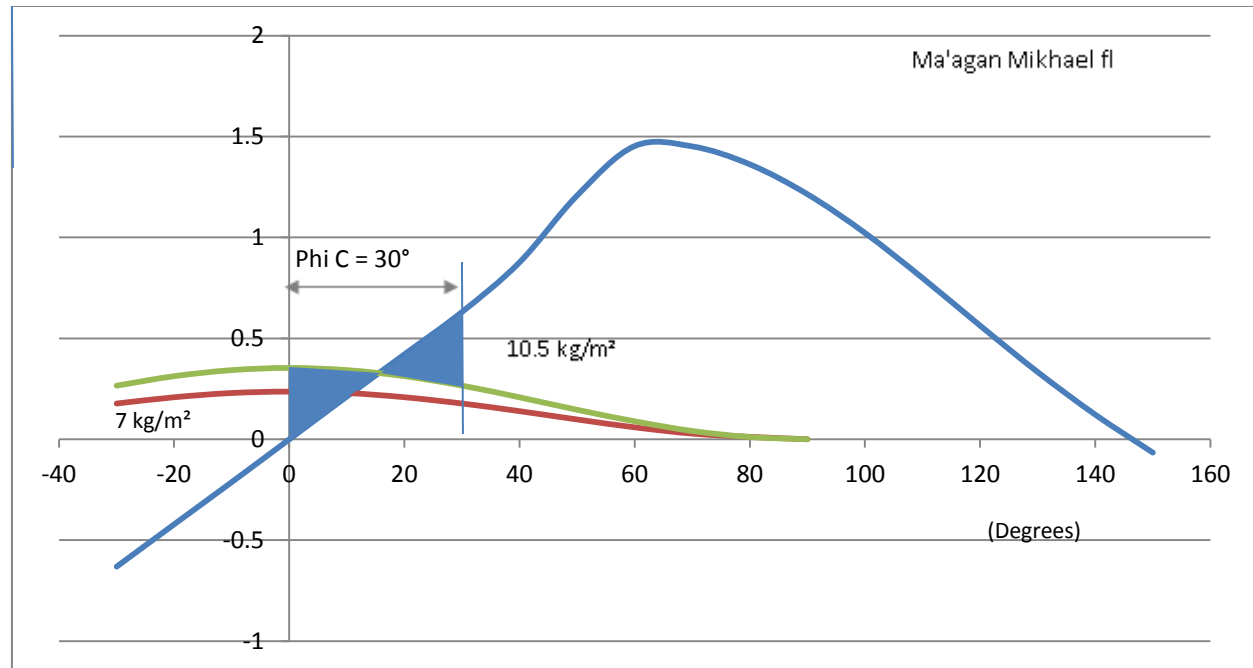
**בעמ' 36-37 ניתן לראות :**

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

Phi C חושב גרפית ע"פ הקריטריון של השוואת השטחים ונמצא:

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





עד כאן עמדנו היטב בקריטריון היציבות.

### **8. מצב ניזוק**

במצב ניזוק יש להראות דופן חופשית בגודל 10 ס"מ עד לנקודה הנמוכה של הלזבזת.

במצב זה נפח הליווח המקורב שחושב קטן ב 20 ס"מ ויהיה :

$$15.5 \times 2 \times 3.4 \times 0.0425 = 4.458 \text{ מ"ר}$$

נפח זה יגרום לציפה בערך :

$$4.458 \times 1.025 = 4.57 \text{ טון}$$

### **נוסיף גופי ציפה בתוך התאים בחרטום ובירכתים בנפח 3 מ"ק**

התוספת הנ"ל תיתן לנו ציפה בערך :

$$3 \times 1.025 = 3.075 \text{ טון}$$

המאזן הכללי שיתקבל:

$$7.255 - 3.075 = \underline{\underline{4.180 \text{ טון} < 4.57 \text{ טון}}}$$

לאחר הבניה יבוצע ניסוי הטיה ושקילה ואז יעודכנו החישובים

## 9. חישובי חוזק

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

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

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

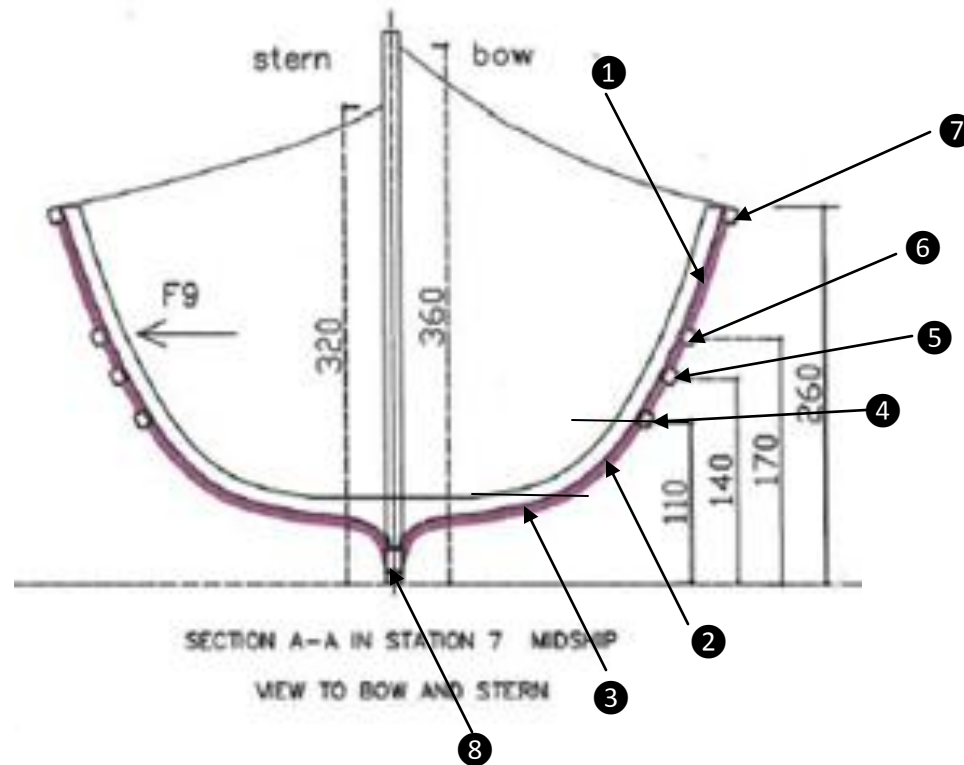
L = אורך קו המים במטרים

B = רוחב מכסימאלי

$\sigma_u$  = החוזק הנמוך מבין קריעה / מעיכה ב Mpa

$\sigma_u = 40 \text{ Mpa}$  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 <sub>pi</sub>	המרחק מהלזבזת בס"מ Y <sub>pi</sub>	מודול החתך בסמ"ק Z <sub>pi</sub>
1	638	75	47850
2	234	178	41652
3	468	220	102960
4	80	150	12000
5	80	120	9600
6	80	90	7200
7	80	4	320
8	240	248	59520
	ΣA <sub>pi</sub> = 1900		ΣZ <sub>pi</sub> = 233252
		Z <sub>p</sub> = 233252 cm <sup>3</sup>	

i	שטח הסיגמנט בסמ"ר A <sub>fi</sub>	המרחק מהכוער בס"מ Y <sub>fi</sub>	מודול החתך בסמ"ק Z <sub>fi</sub>
1	638	185	118030
2	234	83	19422
3	468	45	21060
4	80	110	8800
5	80	140	11200
6	80	170	13600
7	80	260	20800
8	240	12	2880
	ΣA <sub>fi</sub> = 1900		ΣZ <sub>fi</sub> = 215792
		Z <sub>f</sub> = 215792 cm <sup>3</sup>	

$$Z = 3600 L^2 B 1 / \sigma_u = 3600 \times 10.5^2 \times 4.42 \times 1 / 40 = \mathbf{43857 \text{ cm}^3}$$

$$43857 < 233252 < 215792$$

חשוב הקו הניטרלי מהשידורית :  $Y_n = Z_f / A_f = 215792 / 1900 = 114 \text{ cm}$

$$J = Z_f * Y_n = 215792 \times 114 = 24600288 \text{ cm}^4$$

מומנט האינרציה ע"פ הקרטיון :  $J = 0.14 * L * Z * \sigma_u = 0.14 \times 10.5 \times 43857 \times 40 = 1563162 \text{ cm}^4$

$$2578792 < 24600288$$

**החתך המרכזי עומד היטב בקרטיוני החוזק**

## 10. 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.

## 11. 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