

ד"ר ד. קימלפלד

# כבוש מצולות הים



שמיר

ספרית החבל הימי לישראל

ד"ר ד. קימלפלד

# כבוש מצולות הים

הוצאת מרכז החבל הימי לישראל  
תל-אביב, אייר תש"י



### אגדות ומקורות היסטוריים על הצלילה

אגדות רבות מימי קדם מעידות על התענינותם של העמים העתיקים במצולות הים. האגדה היוונית מספרת שגלאוקוס, בונה ספינת הארגונאוטים<sup>1</sup>, ירד פעם בשעת סערה לקרקע הים ושהה שם יום שלם אצל ידידו אוקינוס, אל הים. בשפות שונות נשתמרה אגדה על אלכסנדר מוקדון, המספרת, כי אחר השלימו את כיבושיו על פני הארץ ירד לקרקע הים לראות את פלאיו וליטול מאוצרותיו. מסופר שם כי אלכסנדר הורד הימה בתוך כלי זכוכית שהיה קשור לספינה בשרשרת בת מאתים אמה. מן הראוי לציין, כי באגדה קדומה זו גלום רעיון שלא נתגשם אלא בימינו אלה, על ידי החוקרים האמריקאיים ביבה ובארטון, שבנו את כדור-המצולות וצללו בו עד לעומק של 923 מטר.

הידיעות ההיסטוריות הראשונות על הצלילה מצויות בספרי ההיסטוריונים היווניים מהמאה החמישית. מכתבי הרודוטס אנו למדים כי יורדי הים שבימיו ידעו כיצד למדוד את עומק המים בקרבת החופים ואף לקבוע את טיבו של קרקע שבקרבת החופים. ידיעות אלה היו הכרח חיוני לבטחון השיט.

באחד מספריו של תוקידידס אנו מוצאים פרט מענין מימי

1) הארגונאוטים — גיבורי האגדה היוונית שהפליגו בספינה "ארגו" לקולכיס, שממזרח לים השחור, כדי להביא משם את גיזת הזהב.

צ'וֹר הַמַּעֲטָפָה מֵאֵת שְׁמִיר  
דְּפוֹס הַפּוֹעַל הַמּוֹרָחִי, תְּלֵאבִיב, רח' הרצל 78, טל. 5458



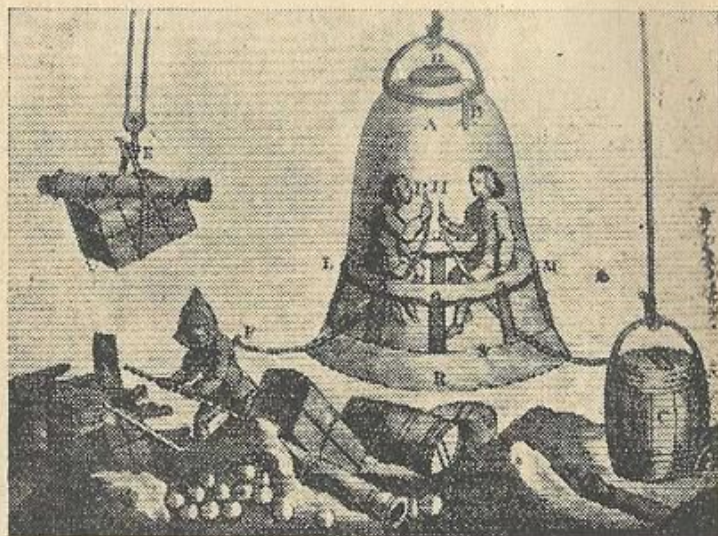
המלחמה בין אתונה וסיראקוס שבסיציליה (בשנת 414 לפני הספירה):  
אנשי סיראקוס תקעו יתדות בקרקע הים, כדי לפגוע באניות אתונה  
לכשתתקרבנה לחוף, אך אמודאי אתונה גילו את המוקשים התת-  
מימיים הללו וכרתום במשורים.

בכתבי הפילוסוף אריסטו, שחי במאה הרביעית לפני הספירה,  
אנו מוצאים ידיעות על אמודאים. מהתיאור הניתן שם אנו למדים  
כי אמודאי הימים ההם היו מצוידים בצינורות להספקת אויר,  
שקצותיהם היו מעל פני המים.

אם כי אין ידיעות קדומות יותר על הצלילה אין כל ספק  
שראשיתה של אמנות זו נעוצה בתקופה קדומה מאוד בתולדות  
האנושות. במקור סיני, המספר על המתנות שהגישו שבטים פראים  
לקיסר הסיני בשנת 2250 לפני הספירה, נזכרים בין שאר הדברים גם  
פניני חילזון. בחורבות בארם-נהרים מהאלף החמישי נמצאו קישוטים  
עשויים צדף. אין להשיג פנינים וצדפים בכמות ניכרת אלא על ידי  
צלילה. מסתבר, איפוא, מהעובדות הנ"ל שאמנות הצלילה היתה  
ידועה לתושבי סין עוד באלף השלישי ולתושבי ארם-נהרים באלף  
החמישי לפני הספירה.

אחד הציורים הראשונים בענין הצלילה נמצא בכתב-יד צרפתי  
מהמאה השלוש-עשרה. נושא הציור היא האגדה על צלילתו של  
אלכסנדר מוקדון לקרקע הים. הציור מראה את אלכסנדר בעמדו  
על קרקע הים בגיגית זכוכית, הקשורה בחבלים לסירה שעל פני  
המים. ציור ראשון של תלבושת אמודאי נמצא בספר על עניני צבא  
שהופיע בשנת 1553. בתלבושת זו צמוד הכובע לגוף האמודאי, והוא  
מצויד בצינור ארוך שקצהו בולט מעל לפני המים. הצינור מחובר  
לשלפוחית מלאה אויר, הצפה על פני המים. האמודאי נמצא בעומק  
של מטר וחצי מתחת לפני המים, שהוא גבול העומק שבו אפשר  
להשתמש במכשיר ממין זה.

ספרים מהמאה השבע-עשרה מכילים ידיעות רבות על נסיונות  
צלילה ועל אמודאים שהצליחו להציל אוצרות מתוך אניות שטבעו.  
לפרסום רב הגיע האמודאי האנגלי ויליאם פיליפס, שהעלה בשנת  
1667 מאתים אלף לירה מאניה ספרדית שטבעה. מאמצים רבים  
ללא תוצאות חשובות נעשו לשם הצלת האוצרות שירדו לתהומות  
באניות ה"ארמאדה" הספרדית, שיצאה ב-1588 להכניע את אנגליה.



פעמון הצלילה של סמיטן.

שיכלול באמצעי הצלילה ניכר מאחת התמונות, בספר על הישגים  
טכניים, שפירסם הכומר גספר שוט בשנת 1664. האמודאי שבציור  
זה מצויד בכלי דמוי פעמון גדול, שבו קבועים אשנבים קטנים,  
במקום הכובע המסורתי. בספרות התקופה ההיא מצויות ידיעות רבות  
על אמצאות במקצוע הצלילה, אך רוב המכשירים הנזכרים שם לא



היו ראויים לשימוש. אף על פי כן מילאה ספרות זו תפקיד חיובי בהתפתחות הצלילה, כי הרעיונות שהיו גלומים באחדים מהמכשירים הללו עוררו נסיונות חדשים, שהביאו לבסוף לפיתוח מכשירים מועילים. מבחינה זו חשוב מכשיר הצלילה שהמציא האיטלקי בורלי. מכשיר זה הוא הראשון המכיל צינור מיוחד לפליטת האויר המשומש. שיכלולים חשובים מצויים גם בפעמון הצלילה של התוכן והפיזיקאי אדמונד האלי (Halley), 1656 — 1742. בחלקו העליון של פעמון זה קבוע אשנב גדול. שתי חביות המורדות לסירוגין מספקות את האויר לנשימה והפעמון מצויד בברז לפליטת האויר המשומש. אך את הצורה המושלמת של פעמון-הצלילה יצר ג'ון סמיטון (Smeaton) בשנת 1790. המים חודרים לפעמון מלמטה עד אשר משתווה לחצם ללחץ האויר שבפעמון. בחלל העליון, החפשי ממים, יכולים לעבוד.

#### הגורמים שהניעו את האדם לכבוש את מצולות הים.

מהמקורות ההיסטוריים שנזכרו לעיל אנו למדים, כי שלושה הם הגורמים שהניעו את האדם לכבוש את מצולות הים: א) השאיפה העזה הטבועה בנפש האדם לחקור ולהכיר את מהותו של כל היקום, ואת הנעלם והנסתר מן העין במיוחד; ב) צרכים כלכליים (בטחון תנועת השיט, שליית פנינים וצדפים, הצלת מטענן של אניות שנטרפו); ג) צרכים צבאיים.

עם התפתחות הציביליזאציה גבר הכוח הדוחף של כל אחד מהגורמים הללו. בפני המחקר המדעי נחשפו במצולות הים גנזי דעת לאין ערוך הזורעים אור חדש על בעיות יסוד שונות ומגלים אפקים חדשים.

ממחקר האוקינוס וקרקעו-התעשרו ביחוד הביאולוגיה והגיאולוגיה.

4) כבר המשלחת האוקיאנוגרפית הראשונה — משלחת „לייטנינג“ (באוגוסט — 25 בספטמבר 1868), הוכיחה, שקיימים בעלי-חיים במצולות עד לעומק של 1200 מטר לפחות. היא גילתה מינים חדשים של בעלי-חיים, שהמדע לא ידעם לפני כן, ומצאה מינים שעקבותיהם על פני הארץ נעלמו מאז תקופת הטרציאר. אחרי פסיעה ראשונה זו נעשה צעד גדול קדימה. משלחת „צ'לנג'ר“ (Challenger) יצאה ב-1872, מטעם הממשלה הבריטית, למסע סיור של שלוש שנים ומחצה מסביב לכדור הארץ. קבוצת אנשי המדע שבמשלחת הזו חקרה את העומק, הטמפרטורה, המליחות (אחוז המלחים), הזרמים, בעלי-חיים והצמחים בחלקים שונים של האוקינוס ואת שכבת המשקעים שעל קרקעו. את תוצאות מחקריה הגישה המשלחת בדין וחשבון הקלאסי שלה, המכיל 50 (חמשים) כרכים בפורמאט „קוארט“.

מהמליחות של מי הים וממבנה קרקע הים יסיק הגיאולוג מסקנות על גיל הארץ ותולדותיה. „סודותיה העיקריים של הגיאולוגיה חבויים במידה רבה מתחת לפני האוקינוס“, כותב פרופ' ר. א. דאלי, אחד מגדולי הגיאולוגים בימינו.

גם הפיסיקה (וענף המטיאורולוגיה במיוחד) מוצאת ענין רב בתנאי האור, הטמפרטורה והצפיפות בעמקים שונים של הים, וכן במהירות זרמי הים ובכיווניהם.

וגוברים והולכים האינטרסים הכלכליים הכרוכים במצולות הים וקרקעו. למדידות העומק, ששיעורן והיקפן גדל במידה עצומה כתוצאה מגידול נפח האניות והתפשטות קוי השיט על פני כל הארץ, נודעת חשיבות נוספת עם הנחת כבלי הטלגראף והטלפון התמימי (הכבל הטראנס-אטלאנטי הראשון הונח ב-1866). ואפשרויות כלכליות חדשות מתגלות והולכות במצולות הים וקרקעו. במי הים מצויים כל היסודות הכימיים שעל פני הארץ, וכימאים רבים הוגים בשיכלול שיטות ההפקה ממימי הים של אותם היסודות שחשיבות



כלכלית רבה נודעת להם. הכימאי היהודי הגדול פריץ האבר (1868 — 1934), שהורה את הדרך ליצור דשנים חנקניים סינטטים, עסק גם בבעיית הפקת הזהב ממימי הים. הוא אסף דוגמאות של מי הים מכל האיזורים, מהקטבים ועד למשוה, ביצע אלפי אנאליזות לשם קביעת אחוז הזהב בכל מקום ומקום, והמציא תחבולות לאין מספר לשם שיכלול שיטות ההפקה והזולתן.

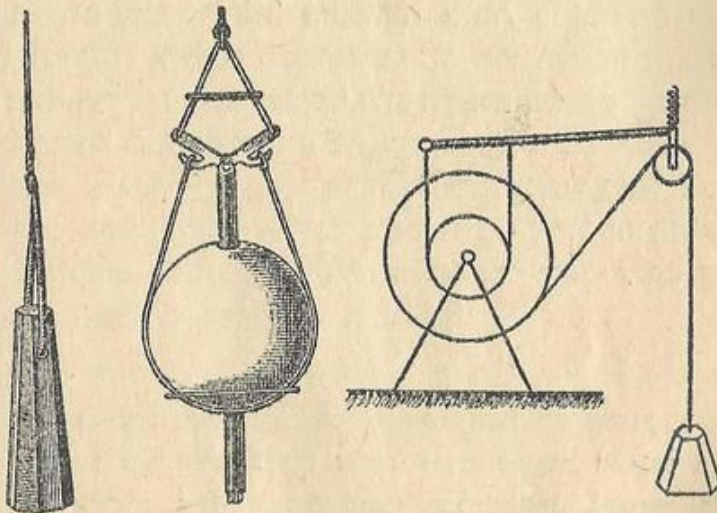
ויש מתכות אחרות שבעיית הפקתן מהים חשובה עוד הרבה יותר מזו של הזהב. לפי ידיעות מוסמכות נתדלדלו כבר מאוד המקורות היבשתיים של כמה מהמתכות החשובות, כגון עופרת, אבץ וכרום. בעתיד הקרוב נעמוד, איפוא, בפני ההכרח למצוא דרך להפקת המתכות הללו ממי הים ומקרקעו. ובעיית הנפט אף היא עומדת ללבוש צורה חדשה עם התגלותם של מקורות נפט חדשים על קרקע הים. במקומות רבים עוסקים עכשיו בפיתוח שיטות קידוח חדשות שתאפשרנה להגיע לעומק רב יותר ובפיתוח שיטות-הפקה חדשות שתתאמנה לקידוחים הללו.

גם שיכלול שיטות המלחמה גורר התקדמות נוספת בכיבוש מצולות הים. במשך שתי מלחמות העולם חלה התקדמות עצומה בהתפתחות המוקשים הימיים והצוללות וכן באמצעים להשמדת כלי המלחמה הללו. בשלב מאוחר של מלחמת העולם השנייה התפתח כוח לוחם תת ימי חדש — השחינים התת-מימיים, המכונים "אנשי-צפרדע".

ככל שאר הכיבושים מושתת גם כיבוש מצולות הים על פעולת מחקר יסודית. שתי צורות לפעולה זו: המחקר הבלתי-יישיר, המבוסס על השימוש במכשירים (למדידת העומק, לבדיקת מי הים, לבדיקת קרקע הים, לקביעת כיווני הזרמים ומהירותם, למדידת עצמת האור וכו') והמחקר הישיר, המבוסס על הסתכלותם ועבודתם של אמודאים.

### מדידת-העומק

המכשיר הפשוט ביותר למדידת העומק הוא האנך, כלומר משקולת עופרת קשורה לחבל. אך למדידת עומק ניכר לא יצליח מכשיר זה, כי בשל החיכוך הרב שבין המים והחבל קשה מאוד להרגיש במגע המשקולת בקרקע הים. הצרפתי אימה שיכלל את מדידת-העומק ובעזרת מכשירו ביצע ב-1841, בימה של אלג'יר, מדידות עד לעומק 1600 מטר. אך שיטת עבודתו לא נודעה ברבים. חשיבות עצומה נודעת למדידת-העומק שהמציא האמריקאי ברוק ב-1855. מכשיר זה מורכב מכדור חלול ונקוב בקצות קטרו, המחליק על גבי קנה חלול ותלוי בעזרת חוט ושתי טבעות על שני ווים שמעל לקנה. עם נגיעתו של הקנה בקרקע, יורדות הטבעות מעל הווים ועל ידי כך ניתק הקשר שבין הכדור והמדידת-העומק. ההקלה שחלה במשקל המכשיר



משמאל לימין:

אנך העומק; מדידת-העומק של ברוק; תרשים מכונה למדידת העומק.



עם ניתוק הכדור מבשרת למודד כי קצה הקנה נגע בקרקע. הקנה החלול מתמלא חומר מוצק מקרקע הים; שלל זה משמש הוכחה נוספת למגע בקרקע הים, ועם זאת — מקור לחקר טיבו של קרקע זה.

אך גם מכשיר זה היה מוגבל ביכולתו וכדי למדוד את תהומות הים היה צורך במכונות משוכללות. הומצאו דוגמאות שונות של מכונות לתכלית זו (הדוגמה הראשונה הומצאה על ידי תומסון ב-1888). שנשתכללו והלכו במשך הזמן. כולן מורכבות בעיקר מחלקים אלה: 1. תוף, שעל גביו כרוך חבל המדידה; 2. מערכת גלגלים שעל גביהם נע החבל; 3. בלם לשם ויסות מהירות הירידה של החבל; 4. מונה-סיבובים, המאפשר להעריך את העומק; 5. ידית לסיבוב התוף.

על אף השיכלולים המיכאניים המעולים שבכמה מהמכונות הללו אין להם כיום אלא חשיבות היסטורית בלבד, כי בינתיים הומצאו מכשירי מדידה אחרים, המבוססים על יסודות אחרים לגמרי והמאפשרים, על אף פשטות מבנם, למדוד בלא כל קושי ובדיוק רב כל עומק שהוא. בפרקים הבאים נדון על שני מיני מכשירים: האחד מהם מבוסס על מדידת הזמן העובר בין שידורו של הקול והחזרתו מעל קרקע הים, והשני — על ניצול תכונותיהן המגנטיות של מתכות מסוימות לשם יצירת התנדנדות במי הים ולשם קליטת ההתנדנדות המוחזרת מעל קרקע הים.

(2) אורך החוט השקוע בתוך המים אינו מזוהה עם העומק, כי החוט מתעקם בהשפעת זרמי הים. הטעות עלולה להגיע לשיעור של 3% מהעומק הנמדד. לשם צימצום שיעור הטעות חוברו טבלות-תיקון, המביאות בחשבון את אורך החבל ואת הזווית שבינו לבין האנך. באופן זה אפשר לצמצם את הטעות עד כדי 0.4%.

### מדידת העומק בעזרת הקול

המכשירים המודדים את העומק לפי הזמן הדרוש לקול, כדי להגיע לקרקע הים ולחזור משם, הם משני סוגים. הסוג האחד יוצר קול רגיל, שאוזן האדם מסוגלת לקלוט, והסוג האחר יוצר קול שמחמת תדירותו<sup>(3)</sup> הגבוהה אין אוזן האדם מבחינה בו. אוזן האדם אינה מסוגלת להבחין בקולות שתדירותם עולה על 20.000 תנודות לשנייה. קולות כאלה, שאין אנו מרגישים בהם, מכונים קולות עיליים—אולטרא-סונים בלע"ז.

א. מדי-עומק בקולות הגילים

העקרון המונה ביסודם של מדי-עומק אלה הוא פשוט בתכלית. מחלק תתמימי של האניה משדרים קול (למשל: יריית רובה, מהלומת פטיש וכו'). הקול מגיע לקרקע הים והדו נקלט במיקרופון. אם יודעים את הזמן שעבר מן הרגע בו נוצר הקול עד לרגע בו נקלט הדו ואת מהירות הקול במי הים (כ-1500 מטר לשנייה), אפשר לחשב את העומק לפי הנוסחה דלהלן:

$$ע = \frac{ז \cdot מ}{2} = \frac{ז \cdot 1500}{2}$$

ע— העומק, מ — מהירות הקול במי הים, ז — הזמן שעבר מהרגע בו נוצר הקול עד לרגע בו נקלט הדו. אם הזמן הוא, למשל, 6 שניות, הרי העומק הוא 4500 מ'.

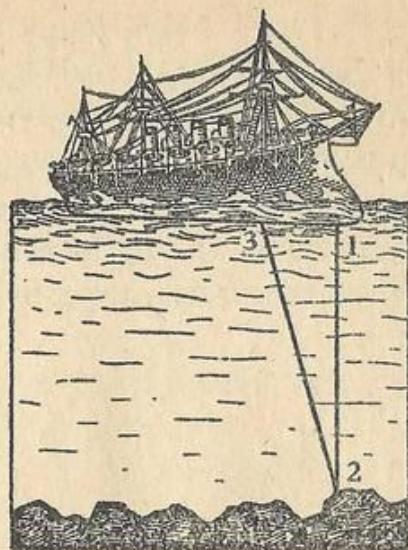
(3) תדירות — מספר התנודות לשנייה המבוצעות ע"י האמצעי המתנדנד.



התפשטותם לכל עבר. לשם יצור קולות עיליים מנצלים את התכונות הפיאזואלקטריות של מינרלים מסוימים. לאחדים מהם, וביחוד לקווארץ, ישנה תכונה אפיינית זו: אם חותכים מגביש של מינראל כזה לוחית בתנאים מסויימים (לפי הציר האפטי של הגביש) ולוחצים על שני צדי לוחית זו, מתחשמלים שני הצדדים; הצד האחד נטען במטען חיובי והאחר במטען שלילי. תופעה זו היא הפיכה, כלומר: אם יוצרים בין שני צדי הלוחית הפרש של פוטנציאל, נגרמת על ידי כך התכווצות או התפשטות הלוחית, לפי כיוון הזרם החשמלי. יכולים, איפוא, להפוך התנדנדות חשמלית להתנדנדות אלאסטית (התכווצות והתפשטות) של גביש הקווארץ והתנדנדות אלסטית של גביש הקווארץ להתנדנדות חשמלית. אם מכסים את לוחית הקווארץ משני עבריה בלוחות פלדה ומיצרים בין שתי לוחיות הפלדה הפרש פוטנציאלים בשיעור של 2500 וולט יכולים לעורר התנדנדות אלסטית של הקווארץ בתדירות 40.000 תנודות לשניה. התנדנדותה של לוחית הקווארץ מתפשטת בתוך המים, וקרקע הים מחזירה לתוך המים. מד-עומק ממין זה מורכב מחלקים עיקריים אלה: 1. משדר של קולות עיליים, הניזון על ידי זרם חשמלי בעל מתח גבוה; 2. מכשיר לקליטת ההד ולהמחשתו; 3. מכשיר למדידת הזמן.

במדידות בעומק מועט מצטמצם משך הזמן שבין השידור לקליטה עד כדי 1/100 השניה ואף למטה מזה. במדידות בעומק כזה יש, איפוא, חשיבות משנה לדיקנותו של מד-הזמן.

תוצאות המדידה נראות מיד לעין, ללא כל צורך בחישוב. קיימות שיטות שונות להמחשת התוצאות. שיטה אחת מבוססת על תנועתה של נקודת אור, ושיטה אחרת על רשימתה של צפורן על פני פס ניר.



מדידת העומק בעזרת הקול.  
1. המשדר;  
2. קרקע הים;  
3. המקלט.

קיים קושי מסוים למדוד בדיוק את משך הזמן שבין השידור והקליטה. במכשירים שונים מגיע הדיוק לאלפית השניה. הדיוק המוחלט אינו ניתן להגשמה גם מחמת הקושי בקביעת מהירותו המדויקת של הקול במי הים. מהירות זו אינה שווה בכל עומק. היא גוברת ככל אשר עולה הטמפרטורה, המליחות והלחץ. עם רבוי העומק פוחתת הטמפרטורה ועולה הלחץ. קיימת, איפוא, קומפנזציה יחסית בין שני הגורמים הללו. טבלות-תיקון, המביאות בחשבון את הגורמים הנ"ל, מאפשרות לצמצם את הטעות עד כדי 50 מ' לעומק של 10.000 מ', כלומר עד כדי 0.5%.

ב. מדי-עומק בקולות עיליים (אולטרא-סונים)

יתרון הקולות העיליים על הקולות הרגילים נעוץ בעובדה שאת הקולות מהמין הראשון אפשר להטות לכיוון הרצוי ולמנוע את



### מדד-עומק המגנטי

מדד-עומק זה מבוסס על תכונתן של מתכות מסוימות, וביחוד של ניקל, להתכווץ ולהתפשט בהשפעתו של שדה מגנטי ולעורר זרם חשמלי בעקב התכווצותם והתפשטותם של הגופים המתכתיים. מדד-עומק מכיל מערכת דיסקיות ניקל, הערוכות על גבי מוט. בפעול עליה שדה מגנטי מתחלף, מתכווצת ומתפשטת מערכת הדיסקיות, בהתאם לשינויים החלים בכיוון השדה המגנטי. בדומה להפיכתן של התופעות הפיאזו-אלקטריות קיימות גם כאן הפיכות של התופעות המגנטיות. השינוי במצב המגנטי של מערכת דיסקיות הניקל גורר שנוי בצורתה, המותנה בלחץ הפועל עליה, והוא גורר אחריו שינוי במצבה המגנטי של מערכת הדיסקיות.

התנדנותה של מערכת דיסקיות הניקל, הנגרמת על ידי שדה מגנטי, מתפשטת בתוך המים, ובעקב החזרתה מעל קרקע הים, היא פועלת על מערכת הדיסקיות, משנה את מצבה המגנטי ומעוררת על ידי כך זרם חשמלי בסליל הסמוך לה.

חלקיו העיקריים של מדד-עומק זה הם: 1. משדר; 2. מקלט; 3. מעגל זרם מתנדנד; 4. מכשיר הרושם את העומק הנמדד על פני פס ניר נע.

### מדידת הטמפרטורה

משתמשים בתרמומטרים מתהפכים כדי למדוד את הטמפרטורה של מים עמוקים. העקרון שעליו בנוי התרמומטר הוא של נגרטי וזמברה, שהוציאו את המודל הראשון שלהם ב-1878. ככל מדחום מורכב גם תרמומטר זה ממיכל כספית, שבהמשכו נמצא צנור נימי. בנקודה קרובה למיכל נמצא מעבר צר מאוד, שצורת צואר של חסידה לו. אם התרמומטר מתהפך באופן פתאומי, נשבר עמוד הכספית

בנקודת המעבר. אורך עמוד הכספית פרופורציונלי לטמפרטורת הסביבה ברגע ההתהפכות. בשל צואר חסידה אין התפשטות הכספית במיכל שלאחר-כך יכולה להגיע לעמוד הכספית וזה נותן את הטמפרטורה בשעת ההתהפכות.

נוהגים לשים בצד התרמומטר הראשי מדחום רגיל, המשמש כתרמומטר עזר. עמוד הכספית מתפשט במקצת בין רגע ההתהפכות והרגע שבו נקראת הטמפרטורה, דבר המונע קביעה מדויקת של הטמפרטורה ברגע ההתהפכות. על ידי קריאת הטמפרטורה שבמדחום העזר אפשר לעשות את התיקונים הדרושים לפי הטבלות הניתנות על ידי הקונסטרוקטורים.

שני התרמומטרים נתונים בתוך מעטפת זכוכית שהיא חזקה למדי כדי לעמוד בפני הלחץ שבמצולות. המעטפה מחוברת למסגרת וזו נתונה על כבל. באמצעות מיתקן מיוחד, הנשלח לאורך הכבל, גורמים להתהפכות התרמומטר בעומק הדרוש.

אם מורידים את התרמומטר לא בתוך מעטפה מוגנה אלא באופן חפשי, ישבש מיכל הכספית את צורתו באופן פרופורציונלי ללחצים הפועלים עליו. היה קושי במציאת זכוכית שתשנה את צורתה בלי

שתישבר, אך בעיה זו נפתרה. מורידים בבת אחת תרמומטר מוגן של התהפכות, המורה את הטמפרטורה בעומק מסוים, ותרמומטר בלתי מוגן, שהטמפרטורה שהוא מראה שובשה על ידי שיבוש המיכל והצינור הנימי. ההפרש בין שתי המקראות של התרמומטרים



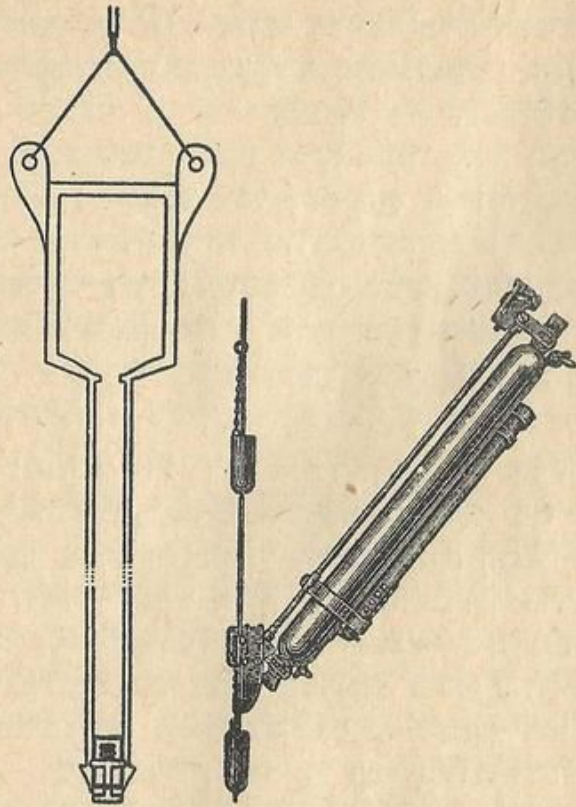


נותן את העומק שאליה הורידו אותם, אם דאגו קודם לכן לכיל את התרמומטר הבלתי מוגן במעבדה.  
לפי האוקיאוגראפים שהשתמשו בשיטה זו אפשר למדוד בה עמקים בדיקנות של  $\pm 10$  מטרים.

### בדיקת קרקע הים

ידיעת עומק המים לאורך נתיב השיט ובקרבנו מהווה לא רק תנאי ראשון לבטחון הספנות אלא גם אמצעי לאוריינטציה. מתוך השוואת תוצאות מדידות העומק שלו עם המספרים הרשומים על פני המפה הימית יכול הספן לזהות את מקום המצאו. דרך אחרת לזיהוי המקום היא השוואת דוגמאות מקרקע הים לנתונים במפה הימית. הספנים מרבים עדיין להשתמש בשיטה זו לשם אוריינטציה בקרבת החופים. אך לא רק הספן אלא גם הגיאולוג, הטופוגראף והכלכלן מתעניינים בהרכבו של קרקע הים.  
המכשיר הפשוט ביותר לבדיקת קרקע הים הוא אנך-העומק שקצהו התחתון חלול וממולא חלב. כשהאנך פוגע בקרקע הים, ממלא המשקע הימי את חלל האנך, ומחמת דבקתו בחלב אין הוא נופל מתוך האנך בשעת העלאתו. אם קרקע הים הוא סלעי, אין האנך מעלה כל חומר מקרקע הים, אך עקבות הפגיעה, הניכרות בו מעידות על אפיו של קרקע זה.

מכשיר בדיקה אחר, פשוט מאוד אף הוא אך משוכלל במקצת מהאנך, עשוי בצורת קופסה בעלת שתי לחיים, המוחזקות במצב פתוח בכוח המתיחה של קפיץ. בפגוע המכשיר בקרקע נסגרות לחיי הקופסה והן כולאות בתוכה כמות מסוימת מהמשקע. חסרונו של מכשיר זה הוא שאין אטימותו מוחלטת, וכתוצאה מכך עלולים מי הים לשטוף את החומר מתוך הקופסה בשעת העלאתה. גם מכשיר



משמאל: המכשיר של פטרסון וקולנברג לבדיקת קרקע הים.  
מימין: צנצנת גאנסאן לבדיקת מי הים.



זה אינו מסוגל להעלות דוגמאות מקרקע סלעי. כדי להעלות דוגמאות מקרקע כזה, יש להקנות למכשיר הבדיקה כוח חדירה רב. נעשו נסיונות במכשירים מצוידים בקפיצים, אך התקדמות ממשית בשטח זה הושגה לראשונה במכשיר המופעל בכוח ההתפשטות של חמרי נפץ, שהומצא על ידי האמריקאי ק. ס. פיגוט ב-1935. מכשיר זה מורכב מצינור פליז הנתון בתוך צינור פלדה וממיתקן המכיל חומר נפץ, הנמצא מעל לצינורות. כשקצה המכשיר פוגע בקרקע הים, מדליק הבודק בדרך חשמלית את מטען הנפץ. בעקב ההתפוצצות חודר צינור הפליז לתוך הקרקע. במכשיר זה העלה פיגוט דוגמאות באורך 3 מטרים מעומק של 5000 מ' ויותר. הודות לכוח החדירה שלו יכול מכשיר זה להעלות דוגמאות גם מקרקע סלעי.

השוודים פטרסון וקולנברג המציאו מכשיר המסוגל להעלות דוגמאות באורך של 15 מ' מעומק של 5000 מטרים. המכשיר הוא בעל כובד ניכר, כדי שיוכל לחדור לעומק הרצוי, והוא שואב את החומר הודות להפרש הלחץ המתהווה בתוכו ברגע בו פוגע המכשיר בקרקע הים. מעל לבוכנה הנמצאת בקצהו התחתון של צינור השאיבה נמצא אויר בלחץ אטמוספרי. בוכנה זו תקועה במקומה בעזרת מעצורים צדדיים. אך עם פגיעתה בקרקע, היא משתחררת מהמעצורים, וכיוון שלחץ המים מבחוץ גבוה הרבה יותר מלחץ האויר שמעל לבוכנה, נדחפת זו למעלה, ובעקבותיה נדחפת לתוך הצינור דוגמה שארכה כאורך הצינור.

בשיטה הזאת השתמשה המשלחת המדעית של המכון האוקיי-אנוגרפי של גטבורג, בהנהלת פרופ' ה. פטרסון, שהפליגה ב-4 ביולי 1947 על ספון האניה האוקייאנוגרפית הגדולה "אלבטרוס". לשם מדידת עובי המשקע שעל פני הקרקע הסלעי משתמשים

בשיטת ההד הכפול. משדרים קול (רגיל או עילי) לעבר קרקע הים. המשקע (אם הוא קיים) מחזיר חלק מגלי הקול, וחלק אחר ממשיך דרכו בתוך המשקע והוא מוחזר מעל פני הסלע. לפי הזמן העובר מהרגע בו נקלט ההד הראשון ועד לרגע בו נקלט ההד השני, אפשר להעריך<sup>1)</sup> את עובי המשקע.

### בדיקת מי הים

הפיסיקאים והכימאים מתעניינים בהרכב מי הים. נטילת דוגמאות מהשכבות העליונות של מי הים אינה כרוכה בשום קושי. כל כלי יכול לשמש לתפקיד זה. אך הענין מסתבך כשרוצים ליטול דוגמה מעומק ניכר. יש להבטיח שהדוגמה תוטל רק מהעומק הרצוי, כלומר שלא יחדרו מים לתוך הכלי, בשעת הורדתו והעלאתו, מהשכבות שמעל לשכבה הנבדקת. האוקייאנוגרפים המציאו למטרה זו מכשירי שאיבה שונים.

משתמשים בשתי שיטות שונות. לפי השיטה האחת מורידים את הצנצנת כשהיא סגורה, פותחים אותה בעומק הרצוי וסוגרים אותה לאחר שניטלה מנת המים הדרושה. לפי השיטה האחרת מורידים את הצנצנת כשהיא פתוחה וסוגרים אותה בעומק הדרוש. מרבית להשתמש בשיטה האחרונה.

מבין מכשירי השאיבה שכיחה ביותר בשימוש צנצנת נאנסן. מורידים אותה כשהיא פתוחה ובמצב מאונך. שני קצותיה מחוברים לכבל ההורדה. בהגיעה לעומק הדרוש מורידים מלמעלה, לאורך

<sup>1)</sup> אפשר רק להעריך בקירוב את עובי המשקע, אך לא למדוד, כי מהירות הקול במשקע אינה ידועה בדיוק.



הכבל, מכשיר המנתק מהכבל את קצה העליון של הצנצנת. כתוצאה מכך מבצעת הצנצנת סיבוב של  $180^{\circ}$  בערך מסביב לצירה התחתון. בעקב התנועה הזו נסגרים שני ברזי הצנצנת ונכלא בה נפח מסוים של מים.

### ז ר מ י ה י ם

באוקינוס קיימים זרמים ממינים שונים: זרמים עליונים (לאורך פני המים), זרמי קרקע (לאורך קרקע הים), זרמים שכוונם מלמעלה למטה ומלמטה למעלה וזרמים מקומיים (בעקב הגיאות והשפל, בגלל הפרשים במהירות ההתאדות והפרשים במליחות).

החשובים ביותר הם הזרמים העליונים הנגרמים בעיקר על ידי מערכות הרוחות המנשבות על פני הארץ. הזרמים הללו משפיעים השפעה עצומה על האקלים. ידועה השפעתם של מימי זרם המפרץ החמים על האקלים של צפון-מערב אירופה והשפעתו של זרם לאַבראָדור הקר על האקלים של החוף המזרחי של ארצות הברית. חשיבותם רבה גם לדיג ולספנות. בעוד שזרם המפרץ משפיע השפעה ברוכה על הדיג ועל הספנות שבצפון-מזרח האטלנטיק, במנעו את התקרבותם של קרחונים לאזור הזה, משמש זרם לאַבראָדור שבצפון-מערב האטלנטיק אבן נגף בדרך הספנות. בגלל הקרחונים שזרם זה מביא ובגלל הערפל המתהווה במקום היפגשו עם זרם המפרץ, נאלצות האניות העושות את דרכן מבריטניה לניו-יורק לזוּתר ברוב חדשי השנה (מינואר עד אוגוסט) על הדרך הקצרה העוברת דרך השרטונות הגדולים של ניו-פאונדלנד ולשוט בדרך ארוכה יותר, דרומית מהדרך הנ"ל.

המטיאורולוג, הספן והכלכלן מעונינים בידיעות מדויקות על מהירויות זרמי הים וכיווניהם.

### מדידת המהירות והכיוון של זרמי הים

הפיסיקאי יכול לגלות תנועות מסוימות של מי האוקינוס לפי השינויים החלים בגורמים הפיסיקאליים (הצפיפות, הטמפרטורה) ובגורמים הכימיים (המליחות, כמות החמצן המומס) של מי הים. אך רצוי מבחינת הנוחות והדיוק להשיג את הידיעות הללו במישרין, על ידי מדידות הידרודינאמיות.

אפשר למדוד את המהירות ואת הכיוון של זרמי הים בדרכים שונות. מטילים בנקודה מסוימת גוף כלשהו המסוגל לצוף על פני המים (בקבוק, חבית), ולפי הנקודה שאליה הגיע הגוף הזה אחרי זמן מסוים, קובעים את המהירות ואת הכיוון של הזרם הימי במקום ההוא. מודדים את שיעור ההסחה שהוסחה אניה על ידי זרם ימי לפי המרחק שבין הנקודה שאליה הגיעה האניה והנקודה שאליה היתה צריכה להגיע לפי החישוב לולא הוסחה מנתיבה. לפי השיטה האחרונה חוברו המפות הראשונות של זרמי האוקינוס. אך השיטות הללו אינן מדויקות למדי. לשם הגברת הדיוק הומצאו מכשירים שונים. מדי-הזרם הפשוטים דומים מבחינה עקרונית למדי-הרוח (אַנאָמומטרים) שבהם משתמשים במטיאורולוגיה. מדי-זרם כזה מורכב ממדחף (פרופלר) המותקן על גבי מסגרת, היכולה להסתובב הן על ציר מאונך והן על ציר אפקי. כיוון המכשיר מראה, איפוא, את כיוון קווי הכוח של הזרם. בעומק מועט פועל מכשיר זה בצורה המניחה את הדעת, כל עוד מהירות הזרם חזקה למדי כדי להתגבר על ההתמד (אינרציה) של המדחף ושל מערכת הגלגלים המשמשת למניית הסיבובים. אבל למדידות בעומק רב יש צורך במכשירים משוכללים יותר. קיימים מכשירים שונים למטרה זו. המשוכלל ביותר הוא המכשיר שהומצא על ידי האוקיאוגראף הצרפתי פיאר אידראק. מכשיר זה רושם רשימה מתמדת ואבטומאטית את המהירות ואת הכיוון של זרמים ימיים ביחס לנקודה קבועה (מצוף



או עוגן). הזרם הימי פועל על המדחף, וזה מפעיל, באמצעות מערכת גלגלים, מגע חשמלי. כל פעם שהמדחף משלים מספר מסוים של סיבובים, נדלקת מנורה חשמלית ועל ידי כך נרשם קו על פני סרט-צילום הנע בתוך המכשיר בקצב קבוע. ככל שמהירות הזרם רבה יותר, כן צפופים יותר וצרים יותר הקווים הנרשמים על פני הסרט.

כיוון הזרם נרשם על פני טבלת הצילום בצורת עקומה, המתקבלת על ידי הטל (פרויקציה) הקווים המסתמנים על פני מצפן מואר.

כל מערכת המיתקנים הללו (המצפן, המנורות, המצלמה, המצברים החשמליים וכו') נתונה בתוך 3 גלילים אטימים, הנשענים על גבי כן, המכיל בתוכו את המדחף. קיימות שתי דוגמאות של מכשיר זה; האחת משמשת למדידות עד לעומק 150 מ' והאחרת — עד לעומק 1500 מ'. מכשירים אלה יכולים לפעול שבוע תמים ללא הפסקה.

### מדידת שקיפות המים

שקיפותם של מי הים אינה שווה בכל מקום. בקרבת החופים ובקרבתם של שפכי נהרות השקיפות מועטת ביותר, מחמת הכמות הגדולה של תרחיפים שהם מכילים שם.

שקיפותם של מי הים, יש בה ענין רב כשלעצמה, אך חשיבות מיוחדת נודעת לה משום שבה תלוי קיומם של הצמחים המיקרוס-קופיים המרחפים במי הים.

האמצעי הישן והפשוט ביותר להערכת שקיפותם של מי הים היא דיסקית לבנה (קטרה — 30 ס"מ), המחוברת מצדה האחד לכבל ההורדה ומצדה האחר למשקולת. שיעור העומק בו נעלמת

הדיסקית מעיני הצופה משמש קנה-מידה לשקיפות המים. במים שקופים אפשר לראות את הדיסקית עד לעומק 70 מ'. ובקרבת החופים יש שהיא תיעלם מעיני הצופה מיד לאחר השקעתה. בדומה לכך משקיעים מנורה ורושמים את העומק בו נעלם אורה.

התוצאות המתקבלות בדרך זו אינן מדויקות ואינן משמשות אלא להערכה בלבד. שיטות המדידה החדישות מבוססות על השימוש בתא הפוטו-חשמלי.

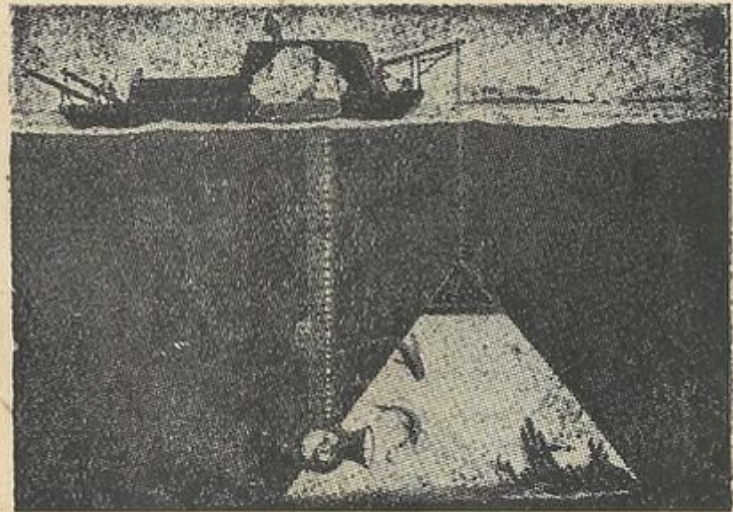
קיימים חמרים שהתנגדותם החשמלית פוחתת בהיפגעים על ידי קרני אור. אחד החמרים הללו הוא הסלניון, אל-מתכת ממשפחת הגפרית. אל-מתכת זו קיימת בשלוש צורות, הנבדלות זו מזו מבחינה פיסיקאלית, אך שוות זו לזו מבחינה כימית. אחת הצורות הללו, המכונה "סלניון אפור" או "סלניון מתכתי", רגישה לפעולת האור. תא הסלניון מורכב בצורתו הפשוטה ביותר משני תילי נחושת, הכרוכים על גבי גליל עשוי מחומר מבודד (למשל: חרסינה) ומחוברים למקור זרם חשמלי. הכריכות מקבילות וסמוכות מאוד זו לזו. בריוח שבין הכריכות נתונה שכבה דקה מאוד של סלניון. כשהתא שרוי באפלה — גבוהה מאוד התנגדותו החשמלית של תא הסלניון (כ-100.000 אום), אך ככל שגוברת עצמת האור פוחתת התנגדותו וכתוצאה מכך גוברת עצמת הזרם העובר דרך התא. עצמת הזרם בתא משמשת, איפוא, קנה-מידה לעצמת ההארה בעמקים שונים. בעזרת המכשירים הללו קבעו כי כבר בעומק של מטר אחד פוחתת עצמת האור ב-50 אחוז ושבעומק של 11 מ' היא יורדת עד ל-10% מערכה המקורי.

המכשירים הפוטו-חשמליים שוכללו מאוד בזמן האחרון. לא זה בלבד שהם מודדים בדיוק מפליא את עצמת האור בשכבות השונות, אלא אף מזהים כל צבע מתרכיבי האור. בדרך זו מצאו כי האור הסגול חודר עד לעומק של 1500 מ'.



### צילומים תתימיים

מהנאמר לעיל בענין שקיפותם של מי הים נובע, כי יכולת הצילום באור השמש מוגבלת בתחומי עומק מצומצמים מאד. צילום בעומק ניכר אינו אפשרי אלא בעזרת מקורות אור מלאכותיים. בעזרת מצלמות אבטומאטיות וזרקורים בוצעו צילומים עד לעומק של 5000 מ'. המצלמה, הזרקור והמצברים (המספקים את הזרם החשמלי) נתונים בתוך תיבת אלומיניום, המצוידת באשנבי פירכס והמחוברת לזבורית (באלסט) באמצעות גוש מלח. המלח נמס לאט במים וכתוצאה מכך משתחררת התבה אחרי זמן מה מהזבורית ועולה על פני המים. מנגנון אוטומאטי מסדיר את פעולת הצילום. הצילום הראשון נעשה 30 שניה לאחר שהמכשיר הגיע לעומק הרצוי ואחריו נמשכת הפעולה בקצב קבוע — צילום לכל 30 שניה.



צילומי התתימיים של ויליאמסון.

עם כל החשיבות שיש להישגים הללו, לקויה פעולה זו בחסרון גדול אחד. היא נעשית אבטומאטית, בלי הדרכתם של עין רואה ושל מוח חושב. אין להפיק מהצילום את כל התועלת הגלומה בו אלא אם יתלווה אדם למצלמה ויצלול יחד אתה למעמקים.

הראשון שירד עם מצלמתו למעמקי הים היה האנגלי ויליאמסון. את צילומיו ביצע בעומק מועט (כ-20 מ'), במים הטהורים והצלולים של "יערות האלמוגים" שבקרבת איי באהאמא (באוקינוס האטלאנטי, ברוחב גיאוגרפי צפוני  $26^{\circ}$  ובאורך גיאוגרפי מערבי  $78^{\circ}$ ).

הודות לאור החזק של השמש באזור טרופי זה ולשקיפותם של המים יכול היה לבצע צילומים רבים בלי להיזקק לאור מלאכותי, אך השימוש בזרקור העלה בהרבה את ערך עבודתו.

תא התצפית שלו היה עשוי בצורת כדור מתכתי שבצדו צינור רחב בצורת קונוס קטוע. הבסיס הגדול של הקונוס הקטוע היה מופנה כלפי חוץ והיה בו אשנב גדול לצרכי תצפית וצילום. תא זה נמצא בקצהו התחתון של צינור מתכתי ארוך, רחב וגמיש, שקצהו העליון היה מחובר לסירה. לשם ירידה מהירה לתא העמד סולם בתוך הצינור. שנים רבות עסק ויליאמסון בצילום המחזות הנהדרים שבתוך הים ואף הסריט סרט לרומאן של ז'ול וורן, "עשרים אלף מיל מתחת לפני הים".

### ה צ ל י ל ה

בהזכירנו את פעולת הצילום של ויליאמסון עברנו כבר מתחום המחקר הבלתי-ישיר לתחום המחקר הישיר, המחייב צלילה למצולות הים.





האמודאי בתלבושתו.

בטרם נתאר את הצלילה, עלינו להזכיר כמה עובדות הנוגעות לתנאי החיים במצולות.

חיי האמודאי השרוי במים תלויים בשני גורמים: בהרכב האויר שהוא נושם ובלחצו של אויר זה. האויר שעל פני הארץ מכיל (לפי הנפח) כ-21% חמצן, כ-79% חנקן ו-0.03% דו-תחמוצת הפחמן. רק החמצן משמש לנשימה. לחנקן אין כל חשיבות לנשימה. בלחץ אטמוספרי רגיל אין כל סכנה בנשימת חמצן טהור, אך בלחץ שלמעלה מהרגיל מותר לו לאדם לנשום חמצן טהור רק בפרקי זמן קצרים ורק כשהוא עובד עבודה קלה מאוד. בעומק של יותר מ-20 מ' כלומר כשלחץ המים הוא למעלה משתי אטמוספירות, אסור לחלוטין לנשום חמצן טהור.

המשקל הסגולי של מים טהורים ב-4°C הוא גראם אחד לסמ"ק. בעומק של 10 מ' יהיה, איפוא, הלחץ של מים טהורים קילוגאם אחד לסמ"ר, כלומר אטמוספירה אחת. לחצם של מי הים, המכילים בממוצע 3.5% מלחים, גבוה במקצת מן השעור הנ"ל, אך בחישובים שנעסוק הפעם נוכל להתעלם מהפרש זה. כן נוכל להתעלם מהפרשי הצפיפות של המים בשכבות השונות. לחץ המים בעומק של 50 מ' יהיה, איפוא, 5 אט', בעומק 1000 מ' — 10 אט' וכו'. ומכיון שעל המים פועל לחץ האויר יהיה הלחץ המחלט בעומק 50 מ' — 6 אט' ובעומק 100 מ' — 11 אט'.

### צ י ו ד ה א מ ו ד א י

לשם צלילה יש לציד את האמודאי באמצעים שיבטיחו: הספקה מאזמדת וקבועה של אויר בהרכב הרגיל וטיהורו של האויר מדו-תחמוצת הפחמן, המתהווה בעקב תהליך הנשימה; הגנה על הגוף בפני לחץ המים מבחוץ; כושר התנגדות ללחץ המים מלמטה;



יכולת לעלות או לרדת בכל רגע שירצה; יכולת להתקשר עם העולם החיצוני. בהתאם למטרות הנ"ל, כולל ציוד האמודאי כסות מיוחדת ומכשירים שונים. הכסות מורכבת מתלבושת, קובע ונעלים. התלבושת מהווה חתיכה אחת והיא עשויה משכבה כפולה של כותנה הספוגה גומי נוזל. באותם חלקי התלבושת העתידים לעמוד בפני פעולת כפיפה או שחיקה תכופה (בברכים, במרפקים ובכפות הרגלים), מודבקת שכבת כותנה נוספת. השרוולים — או שהם מהודקים לפרקי היד באמצעות צמידים חזקים (כדי למנוע בעד חדירת המים מבחוץ ובעד פליטת האויר מתוך התלבושת) או שהם מסתיימים בכסיות.

הקובע עשוי מנחושת או מברונזה. יש קובעים העשויים חטיבה אחת והם מהודקים לתלבושת באמצעות טבעת מתכתית וברגים ויש קובעים העשויים משתי חטיבות, חטיבת ראש וחטיבת שכם, וצוארון התלבושת נתון בין שתי החטיבות הללו ומהודק אליהן באמצעות ברגים.

הקובע מצויד באשנב עליון, 2 אשנבים צדדיים ואשנב קדמי. על פני האשנב העליון נתון סורג־בטחון מתכתי. הקובע גדול למדי, שיוכל האמודאי לסובב את ראשו בנוחות ולהשקיף בעד האשנבים על כל שדה עבודתו.

בתוך הקובע נמצאים: מגומטר בעל חוגה מאירה, שעון וטלפון. אל הקובע מחוברים: כבל הבטחון, הצנור להספקת האויר והצינור לפליטת האויר המשומש והאויר המיותר. את השסתום לפליטת האויר יכול האמודאי לפתוח ולסגור כרצונו. כשהוא רוצה לצלול לעומק רב יותר, הוא לוחץ בראשו על כפתור שבסתום. על ידי כך מתרחב פתח השסתום ומתגבר קצב הפליטה של האויר מתוך התלבושת. כתוצאה מזה קטן נפחה של התלבושת וקטן לחץ המים מלמטה, והאמודאי צולל עד לעומק שבו משתווה לחץ המים מלמטה למשקלו.

הנעלים משמשות לא רק כסות לרגלי האמודאי אלא גם חלק מהזבורית שבה מציידים אותו לשם התגברות על לחץ המים מלמטה. מייצרים נעלי אמודאים בצורות שונות. משקלן 10—20 ק"ג. סוליותיהן עשויות עופרת, ברזל־ציקה או פליו.

הנעלים בלבד אין בהן כדי לספק לאמודאי את הכובד הדרוש, ועל כן מציידים אותו נוסף לכך גם בלוחות עופרת, שהוא מעמיס על גבו ועל חזהו. משקלו של כל אחד מהם הוא 15—20 ק"ג.

בענין הספקת האויר לנשימה קיימות שתי אפשרויות: או שמספקים לאמודאי את האויר מתוך הסירה המלווה או שמציידים אותו במכשיר־נשימה. את מכשיר־הנשימה נושא האמודאי על שכמו. הוא מורכב משני גלילי פלדה, המכילים אויר בלחץ של 200 אט", מקופסה המכילה גרגרים של מימת האשלגן KOH לשם ספיגת דו־תחמוצת הפחמן שבאויר המשומש, וממשאבה השואבת את האויר המשומש מהקובע ומחזירו, לאחר שטוהר בקופסת מימת האשלגן, לקובע. המשאבה מונעת על ידי האויר הדחוס שבגלילי הפלדה.

אמודאי הנושא על גבו מכשיר־נשימה, נושא על חזהו מיכל נוסף של אויר דחוס. מיכל זה משמש לאיזון המכשיר שעל גבו ולהגברת משקלו הכללי של האמודאי. אך תפקידו העיקרי הוא לאפשר את העליה מתוך המים בלי עזרה מבחוץ. כשהאמודאי רוצה לעלות, הוא פותח את שסתום המיכל שעל החזה. בעקב זרימת האויר מהמיכל מתנפחת התלבושת, וכתוצאה מהגדלת נפחו נדחף האמודאי למעלה. בעזרת מחסן זה של אויר דחוס יכול האמודאי לזוסת בכל רגע, לפי הצורך, את כוח העילוי הפועל עליו. דבר הלמד מענינו הוא שאמודאי הנושא על גבו ועל שכמו את המיכלים הנ"ל (משקלו של כל אחד מהם הוא 15—30 ק"ג) אינו זקוק עוד ללוחות העופרת שבהם מצויד אמודאי המקבל את אויר הנשימה ממקור שעל פני המים.



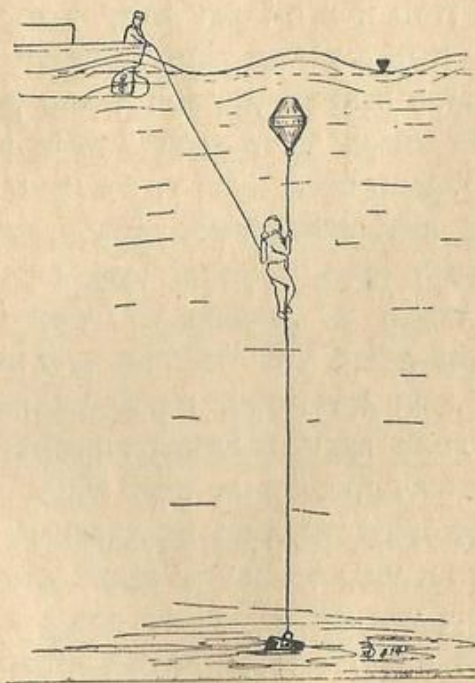
במקום שקיים זרם ימי, זקוק האמודאי למשענת חזקה שיוכל להיאחז בה. לשם כך משקיעים על קרקע הים משקל כבד, הנושא עמוד מאונך. אל עמוד זה מחוברת זרוע, היכולה להסתובב מסביב לעמוד והמצוידת בגלגל. כבל-הירידה קשור אל קצהו העליון של העמוד המאונך. את כבל-הבטחון מעביר האמודאי על גבי הגלגל באופן שיכוון בכיוון אפקי. הודות לכך עומד האמודאי עמידה איתנה. לשם שינוי מקום עמידתו עליו להאריך או לקצר את כבל-הבטחון.

מותר לו לאמודאי לצלול מהר, אך את עלייתו מן המצולות עליו להסדיר באטיות ובוהירות רבה. העומק של 13 מ' מהווה גבול חשוב. כל עוד לא עבר האמודאי תחום זה מותר לו לעלות ללא נקיטת אמצעי זהירות מיוחדים. אבל אם צלל לעומק רב יותר, עליו לנהוג בוהירות רבה, שאם לא כן עלול הוא לחלות במחלת האמודאים ואף לקפח את חייו. הסיבה לכך הן בוועיות החנקן, המתהוות ברקמות ובדם.

החנקן נמס בדם ובשאר הנוזלים שבגוף ומסיסותו עולה ביחס פרופורציונאלי ישר ללחץ. כשהעליה מעומק רב נעשית במהירות, פוחת מהר הלחץ הפועל על הגוף וכתוצאה מכך פוחתת מסיסותו של החנקן בנוזלים שבגוף והוא נפלט מתוכם בצורת בוועיות. הצטברותן של בוועיות אלה בפרקים גורמת כאבים; הצטברותן בעצבים עלולה לגרום שיתוק; אך מסוכנת ביותר היא התהוותן של בוועיות החנקן בדם, כי הן עלולות לסתום את כלי הדם (אמבוליה גאזית).

לשם מניעת התהוות הבוועיות בדמו וברקמות גופו, על האמודאי לעלות לאט לאט. כשהעליה היא אטית, יש לאדם השהות להפליט את החנקן דרך הריאות (כל טיפת דם עוברת במשך דקה פעמים דרך הריאות).

עד לעומק של 6 מטרים בערך, יכול האמודאי לצלול בלי כל אמצעי עזר. אך לשם צלילה לעומק רב יותר, עליו להשתמש בסולם או בכבל שקצהו האחד קשור לאניה וקצהו האחר לקרקע הים. כשהים שקט יכול האמודאי לצלול בעזרת כבל לעומק ניכר, אך כשהים סוער, כרוך השימוש בכבל הקשור לאניה בתקלות רציניות, כי אז מבצע הכבל כל אותן התנודות שמבצעת האניה. לשם מניעת התקלות הללו קושרים את קצהו העליון של כבל-הירידה למצוף הנמצא בעומק של 2—3 מ' מתחת לפני המים. כבל-הירידה הנמתח על ידי מצוף אינו מושפע כלל על ידי גלי הים.



האמודאי צולל בעזרת כבל-ירידה, הנמתח על ידי מצוף.





משענתו של האמודאי על קרקע הים.



### מבולת זמני העלייה ממעולות ים (לפי האלדואן)

משך העלייה כוללה (בדקות)	זמני השהייה בשלבי העלייה השונים (בדקות)								זמן השהייה על קרקע הים (בשעות)	עומק הצלילה (במטרים)			
	3 מ'	6 מ'	9 מ'	12 מ'	15 מ'	18 מ'	21 מ'	24 מ'					
$6\frac{1}{2}$	5								3	3	3 למעלה מ-3	13-11 14 $\frac{1}{2}$ -13	
$6\frac{1}{2}$	5								3	3			3 למעלה מ-3
$11\frac{1}{2}$	10												
7	5												
19	12	5											
37	25	10											
52	30	20											
22	15	5											
47	25	15	5										
77	35	30	10	5									
102	35	35	30	30									
17	7	5	2										
53	20	15	10	5	5								
98	30	30	20	10	8								
163	40	40	35	30	15	2							
32	10	7	5	3	2								
67	20	20	10	5	3								
124	35	30	20	15	10	3							
238	40	40	35	30	30	25							



הביאולוג האנגלי ג'. ס. האלדאן, שעסק הרבה במחקר תנאי החיים בלחץ גבוה, חיבר טבלה, המראה את הזמן הדרוש לשם עליה בטוחה מעומק מסוים, ואת פרקי הזמן שהאמודאי מחויב לשהות בשלבי עלייתו השונים.

טבלה זו מראה לנו כי העליה צריכה להיות מהירה יותר בשלביה הראשונים ואטית מאוד בשלביה האחרונים. אמודאי אשר שהה רבע שעה בעומק של 60 מטר, מותר לו לעלות מיד עד לעומק של 18 מ', ושם עליו לשהות 2 דקות; בעלותו משם לעמקים מועטים יותר, עליו להגדיל את זמן השהיה: בעומק 6 מ' עליו לשהות 7 דקות, ובעומק 3 מ' — 10 דקות.

המספרים הניתנים בטבלה זו הם מינימאליים. הם מחושבים באופן כזה שעם היציאה מהמים לא ירגיש האמודאי אלא כאבים בפרקים ובאברים. אם ברצונו להימנע גם מתקלה זו, עליו להאריך במידה ניכרת את זמן העליה. משום מסיסותו הרבה של החנקן ברקמות השומן (מסיסותו ברקמות אלה עולה פי 6 על זו במים) מחויב אמודאי בעל גוף שמן להאריך את זמן שהותו, בכל אחת מהדרגות המפורטות בטבלה דלהלן, בשליש מהמספר הניתן שם. אם האמודאי עלה מאיזו סבה (חוסר זהירות, לחץ המים וכו') במהירות יתירה על פני המים, עליו לחזור ולצלול מיד עד למחצית מהעומק שאליו הגיע לפני כן. אם אין יכולת להורידו שוב למים (למשל, בגלל מזג האויר), יש להכניסו מיד לתוך שק-האמודאים. למכשיר זה, המשמש להסדרת פליטת החנקן, צורת קונוס קטוע. הוא עשוי אריג ספוג גומי, והוא נתון בתוך רשת של שרשרות ברזל. בשק זה מייצרים תחילה לחץ נמוך כפליים מהלחץ המכסימאלי שפעל על גופו של האמודאי, ואחר-כך מצמצמים אותו בהדרגה עד לשיעור הרגיל. קצב צימצום הלחץ צריך להיות אטי פי שלושה מקצב פחיתותו בעליה מתוך המים (לפי הנתונים בטבלה).

### תנאי החיים במצולות הים

בימי המלחמה האחרונה בוצעו באנגליה עבודות מחקר שיטתיות לבירור מהותן של הסכנות הפיסיולוגיות בשהייה ממושכת במצולות הים ולשם מציאת האמצעים והדרכים למניעת הסכנות הללו.

כיון שהסכנות הצפויות לאדם במצולות הים נובעות בעיקר מהלחץ הגבוה השורר שם, אין הכרח לקיים ניסויים כאלה במצולות הים. אפשר להשתמש בתאים אטימים שבמעבדות-מחקר ולעורר בהם, עקב שינויים מתאימים בלחץ האויר שבתוכם, ממש אותן התופעות הפיסיולוגיות המתגלות במעמקי הים.

הביולוג ג'. ב. ס. האלדאן (בנו של ג'. ס. האלדאן), שעמד בראש אחת מקבוצות המחקר הללו, פירסם לפני זמן מה תיאור מאלף של כמה מהניסויים שנתנסו בהם הוא וחבריו. הניסויים הללו העשירו והעמיקו את ידיעותינו בשטח זה, וחשיבות מיוחדת נודעת לתיאור זה משום שהחוקר מוסר בו לא רק את הפרטים הטכניים של הניסיונות ושל התוצאות, אלא גם את חוויותיו האישיות.

האלדאן מגדיר את הרגשתו של האדם השרוי בלחץ של עשר אטמוספירות כבלתי-נורמלית לחלוטין. דומה היא להרגשה הנגרמת על ידי הרעלה במשקאות כוהליים או על ידי הרעלה קלה באדי בנוזן או בתת-חמוצת החנקן. האדם מאבד כמעט לחלוטין את כושר השליטה במחשבותיו ותודעתו מוצפת זכרונות מימי הילדות ומלים חסרות-משמעות, הנראות אז בעיניו כחשובות מאוד. מענינים מאוד השינויים המתחוללים במצב הרוח, בהשקפת העולם ובכוח האינטלקטואלי של החוקרים שנתנסו בלחץ אויר גבוה. לכמה מהחוקרים היתה ההרגשה שהם נוטים למות ואילו אחרים היו שרויים אז במצב רוח מרומם. אשה אחת הדוגלת בתנאים תקינים בהשקפת עולם מטריאליסטית, הביעה, בהיותה שרויה בלחץ של 10 אטמוספירות, את אמונתה בחסד האלוהי. מבין עשרה תרגילי



כפל פשוטים, שניתנו להאלדאן בשעת הנסיון, לא פתר אלא שלושה בלבד. מלומד מפורסם אחר הספיק לגמור במשך חמש דקות שני תרגילי כפל בלבד, ואחת משתי התוצאות שהשיג לא היתה נכונה! והוא התאונן על שניתנה לו בחינה קשה כל כך.

הקצין האמריקאי באַנקאֶ הראה שאפשר להימנע מהתופעות הללו אם ממירים את החנקן שבאוויר בהליום, כלומר אם נושמים תערובת המורכבת מנפח אחד חמצן וארבעה נפחים הליום. האלדאן וקיים הראו אחר כך, כי אפשר להשתמש למטרה זו גם במימן (יתרוננו לגבי ההליום הוא מחירו הנמוך). הם השתמשו בתערובת המכילה נפח אחד אוויר ותשעה נפחים מימן. בתערובת זו אין החמצן מהווה אלא שני אחוזים בלבד. אבל בלחץ של עשר אטמוספירות מכילה יחידת נפח של התערובת אותה כמות חמצן שמכילה אותה יחידת נפח של אוויר בלחץ רגיל. הדם מספק, איפוא, לגוף בתנאים אלה את כל כמות החמצן הדרושה לו. מאידך, נמוך אחוז החמצן בתערובת מכדי להוות עם המימן תערובת-נפץ. הודות לכך אפשר להחזיקה ללא חשש במצב דחוס בגלילי פלדה. לו היה אחוז החמצן בתערובת גבוה יותר, היתה צפויה סכנת התפוצצות עקב החיכוך הכרוך בפליטת התערובת מתוך המיכל. האלדאן מספר שכל פעם שהאוויר הומר בתערובת הליום-חמצן או מימן-אוויר, חל, תוך שניות מועטות, שינוי לטובה בהרגשתם של החוקרים הללו, שערכו את ניסויהם בגופיהם, ותוך דקה או דקותיים היה בכוחם לפתור את תרגילי החשבון שלא יכלו לפתורם לפני כן.

כבר צוין שבעומק גדול מ-20 מטר אסור לחלוטין לנשום חמצן טהור. שני מיני תופעות נגרמות על ידי נשימת חמצן טהור. בלחץ גבוה פועל החמצן בעיקר על העצבים וגורם לאיבוד ההכרה ולעוית הדומה באפיה לזו שבמחלת הנפילה (אפילפסיה). אלא שהתכווצויות השרירים הן עזות כל כך במקרה זה שהן עלולות

לגרום שבירת עצמות. ויש ששרירי הפנים מתאבנים ומפרפרים. שהייה ממושכת בלחץ בינוני (למטה משלוש אטמוספירות) עלולה לגרום לאנשים רגישים דלקת ריאות. אך אנשים רבים יכולים לנשום ללא כל תקלה שעות רצופות חמצן טהור בלחץ של 2—3 אטמוספירות. האלדאן נשם 3 וחצי שעות רצופות חמצן טהור בלחץ של 2 וחצי אטמוספירות בלי להרגיש כל הרגשה בלתי-נעימה.

התקלה היחידה לאחר 4 וחצי שעות היתה כאב בחזה שהרגישו במשך יום או יומים. פעולתו המרעילה של החמצן על מערכת העצבים המרכזית שונה לגבי אנשים שונים, ואף רגישותו של אותו אדם משתנה מיום ליום. גב' האלדאן יכלה ביום אחד לנשום חמצן טהור במשך 88 דקות רצופות ואילו ביום אחר הופיעו תופעות הרעלה לאחר 13 דקות. האלדאן עצמו, שגילה תחילה כוח התנגדות רב לפעולתו המרעילה של החמצן, נעשה לאחר כמאה ניסויים כה רגיש שהיה מתחיל לפרפר לאחר נשמו במשך חמש דקות חמצן בלחץ אטמוספרי.

את כושר התנגדותו של האדם לפעולת החמצן אין לקבוע אלא בדרך הניסוי. אין כל יכולת להעריך סגולה זו על סמך תכונות אישיות, כגון: כוח גופני, מצב בריאות טוב, כוח גופני רב, עצבים בריאים, אומץ לב וכו'. אנשים, שהצטיינו בפעולות קומאנדו, בטיפול במוקשים תת-מימיים או בפעולות נועזות אחרות, גילו חולשה מפתיעה לגבי פעולת החמצן, בעוד שאנשים חלשים וקשישים ואף אנשים בעלי נטיות היסטריות הרגישו את עצמם בטוב.

האלדאן גילה לתמהונו שהדעה המקובלת כי החמצן הוא מחוסר טעם אינה נכונה כלל וכלל. הוא מצא שטעמו של חמצן טהור בלחץ של שש אטמוספירות הוא מתוק וחמוץ כאחד, «כטעמה של דיו דלילה המכילה קצת סוכר». ואין להתפלא על כך שדבר זה נעלם עד עכשיו מאתנו; הלא ריכוזו של חמצן טהור בלחץ של שש



אטמוספירות גדול פי 30 מריכוזו באויר בלחץ אטמוספרי. משל למה הדבר דומה: לתמיסת סוכר שטעמה מתוק למדי בריכוז מסוים והיא מחוסרת טעם בריכוז קטן פי 30 מזה.

קבוצת המחקר של פרופ' האלדאן היתה צריכה לברר מהי מידת הארסיות של דו-תחמוצת הפחמן בלחץ גבוה. בשאלה זו מעונינים אנשי הצוללות. כשצוללת מוטלת על קרקע הים בלי יכולת לעלות משם, חייבים אנשיה להגביר את לחץ האויר בתאי-ההצלה של הצוללת עד לשיעור הלחץ של המים מבחוץ, שאם לא כן לא יוכלו לפתוח את אשנבי היציאה. אם הצוללת נמצאת, למשל, בעומק של 90 מ', עליהם להגביר את לחץ האויר בתאי-ההצלה עד כדי 10 אטמוספירות. אף אם המכשיר לטיהור האויר פועל כהלכה, מכיל האויר בצוללת תמיד כמות מסוימת של דו-תחמוצת הפחמן, ובלחץ של 10 אטמוספירות מכילה יחידת נפח של האויר כמות גדולה פי 10 של גז זה מאשר בלחץ אטמוספרי. מסתבר שאחוז מסוים של דו-תחמוצת הפחמן, שאינו מסוכן כלל בלחץ רגיל, עלול להיות מסוכן מאוד בלחץ של 10 אטמוספירות. הניסויים הראו כי בלחץ של 10 אטמוספירות מאבד האדם הממוצע את הכרתו תוך 5 דקות, אם האויר שהוא נושם מכיל שלשת רבעי אחוז דו-תחמוצת הפחמן.

האדמירליות הבריטית היתה מעונינת בניסויים שיבהירו את מהות פעולתם של מים קרים מאוד על גוף האדם, ואת תגובתו של גוף האדם השרוי במים קרים לגזים השונים שבאויר וללחץ גבוה.

לשם כך היו שוכבים האלדאן וקייס, בהיותם לבושים כותונת ומכנסים, באמבטיה שהכילה תערובת של מים וקרח עד שלא יכלו עוד להשתלט על רעידתם. קייס היה מחזיק מעמד 15 דקות והאלדאן — 20 דקות. תוך כדי שכיבתם באמבטיה הקרה, הוגבר

לחץ האויר שמעליהם והוכנס ולתוכו גזים שונים. בניגוד לדעה המקובלת, מגלה האלדאן שניסויים אלה אינה גורמים כלל יסורים קשים מנשוא. האדם השוכב באמבטיה של מי קרח באוירה דחוסה מאוד אינו מרגיש אלא כאב עז מסביב לצווארו, בשטח הגבול שבין המים והאויר. בשאר חלקי הגוף מאבד העור מהר את רגישותו. כושר ההתנגדות של הגוף לגזים בעלי לחץ גבוה אינו נפגם עקב פעולתם של המים הקרים אלא במידה מועטת בלבד.

מתוך ניסיונו האישי מגיע האלדאן למסקנה שהמשורר האיטלקי הגדול דאנטה, תיאר את יסורי הרשעים בגיהנום, השרויים בקרח נצחי, בהגזמה רבה. אין היסורים הללו נוראים כל כך...

#### האמודאי המשוריין

בתלבושת הגמישה שתוארה לעיל, יכול אמודאי הנושם אויר לצלול עד לעומק של 90 מ'. זמן רב היו סבורים שעומק זה הוא הגבול שאליו יכול להגיע אמודאי מצויד בתלבושת גמישה. אבל המרת החנקן שבאויר בהליום, הרחיב את האפשרויות. אמודאים אמריקניים, שהמירו את החנקן שבאויר בהליום, הגיעו לעומק של 100 מ' ויותר, והמהנדס השוואדי צאטארסטרם, שהשתמש בתערובת שהכילה 4 אחוזים חמצן, 24 אחוז חנקן ו-72 אחוז מימן, הצליח להגיע עד לעומק של 135 מטר.

אבל, על אף כל ההישגים שהושגו בשיכלול התלבושת הגמישה ומכשירי הנשימה, לא סולק מקור הסכנה העיקרי, הכרוך בשימוש בתלבושת ממין זה — ההכרח לנשום גזים בלחץ גבוה.

כדי להימנע מתקלה רצינית זו, היה צורך להמיר את התלבושת הגמישה בתלבושת צפידה, כלומר בשריון שיגן על הגוף בפני לחץ המים וירשה לאמודאי לנשום אויר בלחץ אטמוספרי. מאז 1924

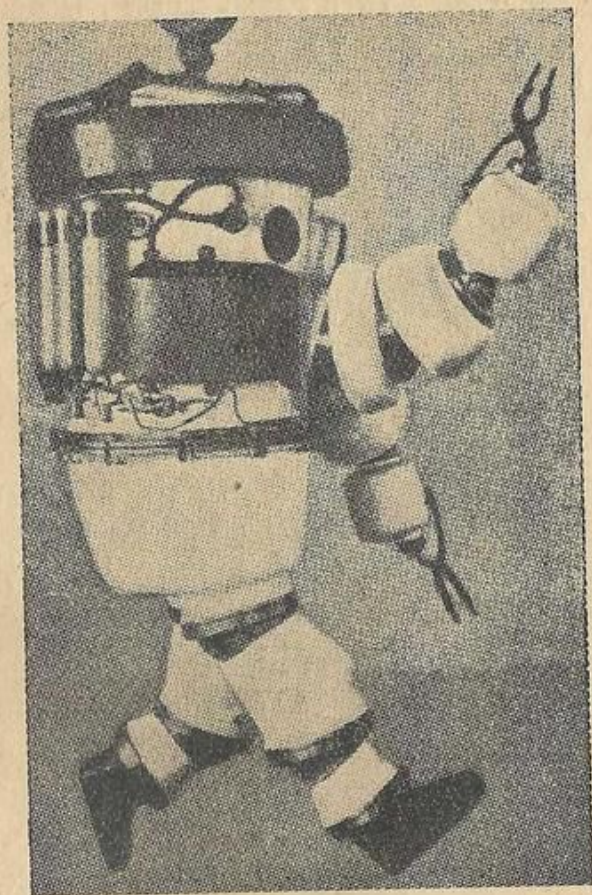


משתמשים אמודאים לצלילה לעומק רב גם בשריונים. שריון האמודאי מורכב מטבעות פלדה או מגלילי פלדה, המהודקים זה לזה באופן שאין המים יכולים לחדור דרכם. השריון מכסה את הגוף בשלמות. את עבודתו מבצע האמודאי במלקחיים שהידים החבויות בתוך השריון מפעילות אותם. חטיבת הראש של השריון מצוידת באשנב קדמי ובשני אשנבים צדדיים, העשויים זכוכית שעביה כ־7 ס"מ.

בתוך השריון נמצא חלל הניתן להימלא, לפי הצורך, מים או אויר. כשהוא מתמלא מים, צולל האמודאי לעומק רב יותר, וכשהאמודאי מכניס לתוכו אויר דחוס, נדחקים משם המים והוא עולה. דבר הלמד מענינו הוא כי גם האמודאי המשוריין מצויד בכל אותם האמצעים והמכשירים הדרושים במצולות הים, כגון: גליל פלדה ממולא אויר דחוס, חמרים כימיים לטיהור האויר, מצפן, מנומטר, טרמומטר, טלפון, פנס וכו'.

היות והאמודאי המשוריין נושם אויר בלחץ אטמוספרי, אין כל סכנה נשקפת לו בעליה מהירה ממצולות הים, אבל הוא כבד-תנועה מאוד, בשל משקל השריון (300—400 ק"ג) ובשל אי-גמישות הפרקים. אף על פי כן הגיעו אמודאים לבושי שריון עד לעומק של 160 מ' והם עבדו בעומק זה עבודה קשה במשך שעות רצופות. כשיש צורך לעבור מרחקים גדולים על קרקע הים בעומק רב, משתמשים במזחלות הנמשכות באמצעות כבלים על ידי סירה השטה על פני המים. האמודאי יושב בתוך המזחלת וקרקע הים מואר בזרקור, הניזון בחשמל מתוך הסירה.

הצלילה לעומק של 160 מ' היתה הישג גדול של המדע והטכניקה, אך האדם לא אמר די בזה. ביחוד לא הסתפקו בהישג זה חוקרי עולם החי שבמצולות. מחקר בעלי החי שבמצולות התפתח



האמודאי המשוריין.



במשך שמונים השנים האחרונות. מניחי יסודותיו של מדע זה היו הסקוטי וייויל תומסון (Wyville Thomson) והאנגלי י. ד. קארפנטר (Carpenter), שביצעו בשנת 1868 (4 באוגוסט — 25 בספטמבר) בספינה „לייטנינג“ את המשלחת המדעית הראשונה הגדולה לחקר החי שבמצולות. עולם שלם, חדש, מקסים ומפתיע נתגלה אז לעיני החוקרים. הוכח אז, שלכל הפחות עד לעומק של 1200 מטר קיימים בעלי חיים. נתגלו מינים חדשים, שהמדע לא ידעם מתמול שלום, ונמצאו מינים מימי תקופת הטריאס, שסבורים היו כי כלו ותמו לגווע. המשלחות המדעיות, במרוצת השנים הבאות, הוסיפו נדבכים על גבי נדבכים בבנין המדע החדש. אך הידיעות שנרכשו היו מבוססות רק על העבודה ברשתות ועל כן גם היו מקוטעות ופגומות. רק חלק קטן מבעלי החיים שבמצולות ניתן להיצוד ברשתות, וגם חלק זה הגיע לידי החוקרים בצורה מושחתת. בשל ההבדל הגדול בלחץ נקרעו אברים פנימיים מתוך הגוף, העיניים יצאו מחוריהן, הקשקשים נשרו וכו'.

מחקר החי שבמצולות העלה את הצורך בחדירה למעמקים ניכרים יותר משהרשה השריון, אך זמן רב נדמה כי נבצר מאת האדם לעבור את התחום של 160 מ'. עד שבאו שני אמריקנים וחוללו מהפכה במושגינו בשטח זה, ופתחו לפנינו אפקים חדשים, מפליאים ומרהיבים.

אוטיס בארטון וויליאם ביבה (Beebe) ביצעו במשך ארבע שנים כיבוש העולה על כל מה שהשיגה האנושיות כולה בשטח זה במשך אלפי שנה.

אוטיס בארטון הגה את הרעיון לבנות כדור, עשוי פלדה, שיוכל לעמוד בפני הלחץ הגדול של המים בעומק של מאות מטרים, ויחד עם ביבה ביצע את הצלילות הנועזות במעמקים, שלא היו כדוגמתן בתולדות האנושות.

### מדורי המצולות של ביבה ובארטון

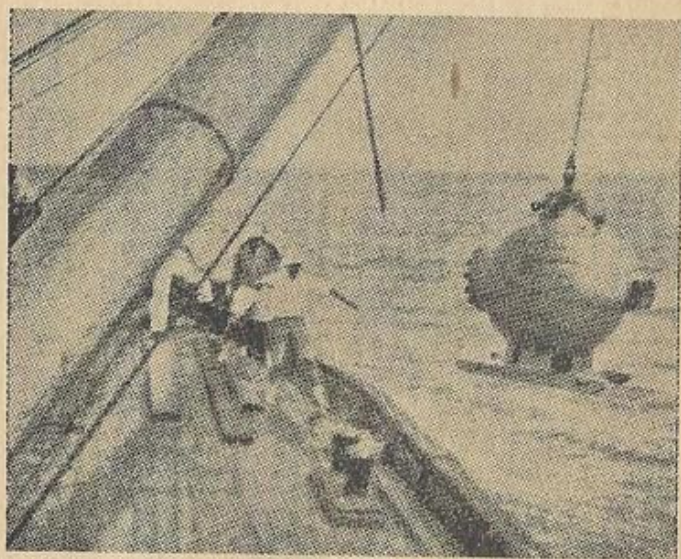
הכדור הוכן מפלדה ממין משובח ביותר. קטרו הפנימי היה 137 ס"מ ועובי דפנותיו  $3\frac{1}{2}$  —  $3\frac{3}{4}$  ס"מ. בגוף הכדור היה פתח כניסה (קטרו 35 ס"מ) ושלושה אשנבים (20 ס"מ הקוטר). להגפת פתח הכניסה שימש מכסה, שמשקלו היה למעלה מ-160 ק"ג, שהוצמד לפתח באמצעות עשר יתדות ובורג חזק. גלילי קוארץ, בעובי שבעה וחצי ס"מ שימשו באשנבים במקום זכוכית. בחרו בקוארץ מפני שהוא החזק מבין כל החמרים השקופים, ומפני שהוא מעביר את כל גלי האור (הזכוכית עוצרת, כידוע, את הקרנים האולטרא-סגוליות). גלילי הקוארץ היו נתונים בתוך צינורות מתכת, ושכבת תחמוצת העופרת סתמה כל נקב קל שבין שני החמרים האלה.

משקל הכדור היה למעלה מאלפיים ק"ג, והוא נתלה בכבל מתכת שקטרו היה  $2\frac{1}{4}$  ס"מ ובכוחו היה לשאת כדור כבד פי שנים-עשר. להורדת הכדור ולהעלאתו היה משמש סליל, שקטרו 25 ס"מ וארכו 168 ס"מ. השקעת הכדור והעלאתו בוצעו באמצעות מכונת קיטור שהותקנה יחד עם כל המכשירים הדרושים לצלילה על סיפון הספינה. להספקת האויר לנשימה הותקנו בתוך הכדור בקבוקים מלאים חמצן דחוס ומצויידים בשסתומים אוטומטיים, המספקים לשני אנשים שני ליטרים חמצן בדקה. לשם טיהור האויר מדו-תחמוצת הפחמן נמצאה תמיסת נתר מאכל ולהנעת האויר הותקנה מניפה חשמלית. הטלפון והזרקור היו מקבלים את הזרם החשמלי מהספינה. במקרה של קילקול בטלפון היה מיתקן שאיפשר לאותת לעובדים באניה על ידי סגירת זרם חשמלי ופתיחתו. המספר הכללי של העובדים בהשקעת הכדור (יחד עם שני האנשים בכדור) היה עשרים ושמונה.

לאחר מספר נסיונות בכדור הריק נכנסו לתוכו ברטון וביבה, ב-6 ביוני 1930, לביצוע צלילתם הראשונה. הם בחרו לשם כך



בנקודה ליד האי נונסוטש (Nonsuch), במרחק 15 ק"מ מחוף ברמודה והגיעו ל-240 מ'. הם עברו איפוא, בנסיונם הראשון, ב-50 אחוז, את ההישגים האחרונים בצלילה בעזרת שריון. הצלילה והעליה יחד נמשכו כשעה. הכל עבר ללא תקלה, רק בעומק של 90 מ' הורגשה חדירה אטית אך קלת ערך (כדי מחצית הליטר) של מים דרך סדק דק מן הדק שהתהווה באורח פלאי במכסה פתח הכניסה, ופעם אחת נפסק זרם החשמל לרגע קט.



מושים את הכדור מהמצולות

אך שני החוקרים לא אמרו די בהישגם. ב-11 ביוני של אותה שנה, חמשה ימים לאחר צלילתם הראשונה, הגיעו ל-429 מטר. הישג גדול לאין ערוך מהראשון. אולם שני הישגים אלה היו רק



ברטון וביבה ליד כדור המצולות.



הצעדים הראשונים בדרך למטרתם. ב־22 בספטמבר 1932 הגיעו בכדור הפלדה שלהם, שכינו אותו בשם „כדור המצולות“ (Bathy-sphere) לעומק של 670 מטר; ב־11 באוגוסט 1934 הגיעו עד לעומק של 765 מטר וארבעה ימים לאחר כך, ב־15 באוגוסט, הגיעו עד ל־923 מטר. כל מדינות אמריקה, והעולם התרבותי כולו, עקבו בנשימה עצורה את הנסיונות הנועזים של החוקרים. כדי לאפשר למיליוני האנשים האלה לעקוב את פעולתם של שני החוקרים בשעת הצלילה, עשתה הנהלת הראדיו האמריקני את הסידורים הדרושים לשידור קולם של ביבה ובארטון בשעת הצלילה. ב־22 בספטמבר 1932, משעה שלוש, כשהגיע הכדור לעומק של 457 מטר ועד שלוש וחצי כשהגיע ל־670 מטר, שמעה אמריקה כולה, וכן חלק מאירופה את קולם של ביבה ובארטון ממעמקים, כשהם מודיעים על כל המתגלה לעיניהם בכל רגע ורגע. לשם כך הוקמה על סיפון הספינה תחנת ראדיו ששידרה את דבריהם של שני החוקרים. שנמסרו באמצעות כבל של 900 מ' מהכדור.

בדברו על חוויותיו בחקר המצולות מציין ביבה ארבעה סוגי רשמים ומאורעות שפעולתם נחרתה עמוק בנפש החוקר. ואלה הם: ניצנוץ ראשון של אור בגוף בעל חי; השתלטות החושך המוחלט; גילוי מין חדש של בעל חי וניצנוץ הכרה חדשה. גדולה ביותר היא ההתרגשות הנפשית של החוקר ברגע שהוא מסיר את הלוט מעל פני אחת התופעות הניראות כמסתוריות.

בשעת צלילתו האחרונה זכה להתגלות כזאת: בעומק של 512 מ' ראה בעל חי מסתער כלפי החלון, אך פונה פתאום הצדה ו— מתפוצץ. ברגע ההוא היה מבטו דרוך ורוחו עז, והוברר לו מה שהיה בעיניו עד לרגע ההוא בגדר חידה סתומה; הוברר לו שזרם הלהבות המתפרץ מגוף השרטונית שבעמקי הים מתאים לזרם הדיו המתפרץ מגוף הספינה החיה על פני המים. תפקיד אחד

לשתי הסגולות האלה — להסתיר את גוף בעל החי מעיני האויב. מענינות ביותר הן תוצאות חקירותיו בשאלות האור שבמעמקים, שנעשו גם על ידי הסתכלות ישרה וגם באמצעות הספקטרוסקופ. סמוך לפני הים הצטמצם הצבע האדום שבספקטרום למחצית רחבו הרגיל. בעומק של 6 מטרים לא נשאר מהצבע מאדום אלא חוט דק ובעומק של 15 מטר תפש צבע התפוז (Orange) מקום בראש. בעומק של 45 נעלם גם הצבע הזה. בעומק של 105 מ' היה הרכבו של האור כזה: 50 אחוז כחול-סגול; 25 אחוז ירוק, ו־25 אחוז אור חלש, חסר גוון מיוחד. בעומק של 135 מ' נשאר רק הסגול, ובעומק של 240 מ' לא נראה אלא פס צר אפור-לבן, הנחלש והולך ומעומק של 600 מ' ואילך אין כל סימן שהוא לאור. על הרושם שעשתה עליו האפלה, — בשכבות העמוקות ביותר שהגיע אליהן, — הוא כותב: „לפני ימים מועטים נראו לי המים שחורים יותר מכפי שאפשר להשיגם בכוח הדמיון, אך הפעם הרגיש המוח שהם שחורים משחור. נדמה לי שלהבא יראו בעיני כל הלילות רק כשליבים שונים של דמדומים. מעתה לא אוכל עוד להשתמש באמנה במלה שחור“.

#### כדורי המצולות והטאנק של הצי האמריקאני

הצי האמריקני הכניס לשימוש מכשיר קטן שהוכן לפי דוגמת הכדור של ביבה. זהו כדור אטום בפני המים המצוייד בשתי כנפיים ובכמה אשנבים. בתוך הכדור יושב אדם אחד, היכול להשתמש במכשיר נשימה. כן יכול הוא להשתמש בזרקורים ובמצלמה. בכדור-מצולות זה משתמשים לאורך החופים. הספינה המלווה יכולה לאספו במהירות של 5 ק"מ לשעה בערך. הצי האמריקני הכין גם טאנק בעל זחלים. הוא אינו תלוי

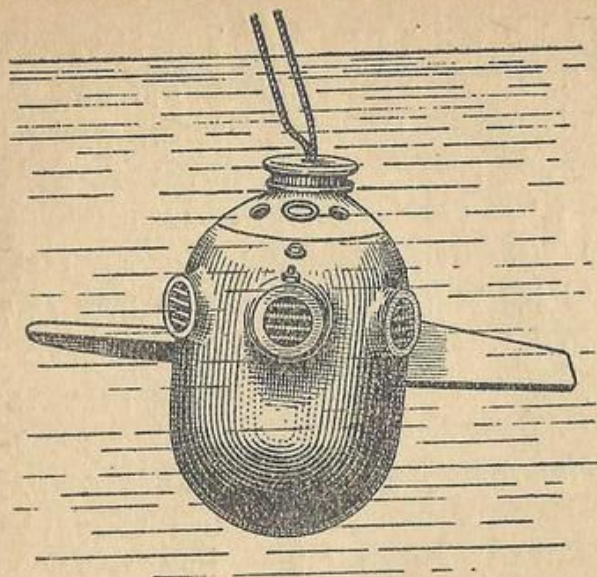


בספינה מלווה. בטאנק ישנם מקומות ישיבה לשני אנשים. הוא מכיל אויר למשך צלילה של 12 שעות. בארבע פינות הטאנק ישנם ווים להחזקת דברים שונים. הטאנק הזה מחושב לצלילה עד ל-600 מ'.

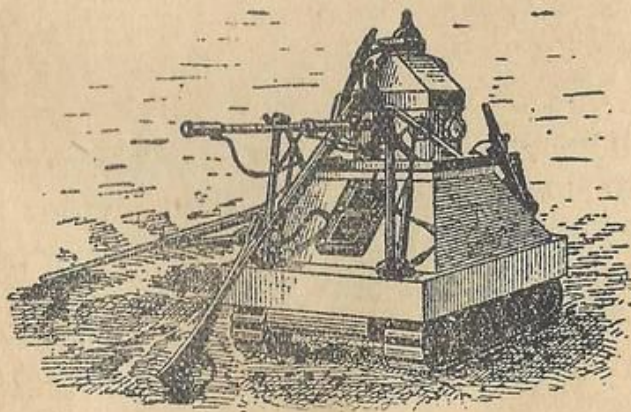
### צוללת פיקאר וקוזין

חוקרי הסטרטוספירה הנודעים מכינים צלילה לעומק בצוללת מיוחדת שהם מכינים לצורך זה. הצוללת עשויה תא פלדה בעובי 9 ס"מ וקוטר פנימי בעובי 2 מ'. לעריכת תצפיות מצוידת הצוללת בשני אשנבים. שני זרקורים חיצוניים מאפשרים תצפיות באור צדדי. כיון שהמשקל הכללי של התא אינו מאפשר לו לשחות בתוך המים, היה צורך לציידו במכשיר-ציפה מיוחד. המכשיר מורכב משבעה צינורות המכילים 32.000 ליטר בנזין. כעקל (עומס) משמשים בלוקים של בטון המבטיחים מהירותה של 1 מ' לשניה. את שיווי המשקל בעומק הרצוי משיגים על ידי אבקת ברזל שתישפך מתוך משפך. כשרוצים להמשיך בירידה מכניסים מים. כשמגיעים קרוב לקרקע הים יכולים להבטיח את השהייה שם באמצעות כבל מיוחד. לשם עליה מקרקע הים מפילים חלק מגושי הבטון. לצוללת יש קוטר-פעולה של 20 ק"מ, תודות לשני מנועים חשמליים צדדיים. את הכוח החשמלי הדרוש לפעולת המנועים, הזרקורים וכו' מספקות סוללות המותקנות מחוץ לתא. כל גושי הברזל, הסוללות, הכבלים וכו' מוחזקים מחוץ לתא בעזרת אלקטרומגנטים. מעגלי זרם מיוחדים מאפשרים להפיל באופן נפרד כל מה שמוחזק על ידי האלקטרומגנטים. במקרה של קלקול המנועים החשמליים, משחררים את כל המכשירים הללו והצוללת עולה יותר מהר מן הרצוי, אבל אין זה אלא תפישת הרע במיעוטו.

הצלילה צריכה להימשך 12 שעות. הנשימה של האנשים



כדור המצולות של הצי האמריקאני



טנק תתימי



מובטחת על ידי בקבוקי חמצן. טיהור האויר מדור-תחמוצת הפחמן נעשית על ידי אלקאלי. הצוללת מחושבת לשני אנשים, נהג ומשקיף. את הקשר עם העולם החיצוני מקיימים באמצעות אולטרא-סונים. תפקיד הספינה המלווה הוא להביא את הצוללת עד למקום הרצוי.



אחד הדגים היפים ביותר שבמעמקי הים. גופו זרוע חמשה טורי פנסים, כדי להאיר את מחשכי הים שאין אור השמש מגיע אליהם.

המשלחת תחקור את העמקים של 4000 מ' הגובלים את מפרץ גוינה. זהו איזור שהתנאים המטיאורולוגיים נוחים בו ביותר לנסיונות מסוג זה.

ב-3 בנובמבר 1948 נעשה נסיון הצלילה הראשון בקרבת העיר דאקאר. הצוללת הגיעה במצב ריק לעומק של 1400 מטר. בשעת העלאת הצוללת נתגלה שמכשיר-הציפה ניוזק. דבר זה גרם לדחיית המשך הנסיונות לתאריך בלתי קבוע.

### בארטון צולל לעומק של 1372 מטר

ב-16 באוגוסט 1949 הגיע אוטיס בארטון לעומק של 4500 רגל, שהם 1372 מטר. יום לפני כן הגיע לעומק של 700 מטר, אך בשל הפסקה פתאומית בחשמל נאלץ להפסיק את הצלילה באמצע. את הצלילה הנועזת ביצע בארטון ליד האי סאנטא קרוז, במרחק 43 ק"מ מחוף קאליפורניה, צפונית לעיר לוס אנג'לוס. משקלו של כדור-המצולות היה הפעם 3175 ק"ג, קטרו החיצוני — 146 ס"מ, עובי הדפנות 4.5 ס"מ, קוטר פתח-הכניסה — 38 ס"מ, קטרו של האשנב האחד היה 14.57 ס"מ וקטרו של השני — 7 ס"מ. האשנב הראשון היה מופנה קדימה, והשני קדימה ולמטה בזווית של 45 מעלות. לאשנב זה היתה צמודה מצלמת ראי-נוע. האשנבים היו עשויים קוארץ.

את מכשיר הצלילה שלו כינה ברטון בשם „בנטוסקופ". המלה בנטוס פירושה ביונית קרקע הים וסקופין פירושה לראות. בשעת הצלילה האחרונה היו לו לבארטון עוד 600 מטר מים מתחתיו, אך הוא החליט לעלות מכיון שאספקת החשמל היתה חלשה. הוא קיבל רק 60 וולט וזה לא הספיק להפעלת הזרקור שהיה בכדור.



מלבד זה סבל בארטון ממחלת-יים ומסחרחורת. עלייתו מהמצולות ארכה שעה ומחצה.

האניה "ולרו 4", של האוניברסיטה בדרום-קאליפורניה היתה אנית-האם של ה"בנטוסקופ", וד"ר מוריס גלס היה המהנדס. שעמד, במשך שני ימי-הצלילה בקשר טלפוני עם בארטון.

### שחינים תת-מימיים

דרכי המלחמה חייבו נסיונות שחיה תת-מימית בציוד קל ואותם האנשים שאומנו לשם שחיה כזאת כונו בשם "אנשי-צפרדע". לפי ידיעות שנתפרסמו בעתונות האנגלית והאמריקאית יכולים אנשי החטיבות הללו לשהות מתחת לפני המים 9 שעות רצופות ולהגיע בשחיה תת-מימית למרחק של 16 ק"מ. חטיבות אלה אומנו בסודיות גמורה, ופרטים על ציודן ועל מעשיהן לא נתפרסמו אלא לאחר המלחמה. זמן רב לא יכלו הגרמנים לגלות את סיבת ההתפוצצויות המסתוריות שאירעו בכמה מנמליהם, וגדולה עוד יותר היתה ודאי השתוממותם על הקלות שבה הגיעו ספינות-הנחיתה של הברית אל חופי צרפת, על אף המוקשים המרובים שהניחו ומחסומי הפלדה שהקימו שם הגרמנים במשך שנים.

חטיבות השחינים התת-מימיים היו מפליגות מחוף אנגליה בסירות גומי קטנות, שמחמת קטנותן לא יכלו אוירונים גרמניים לגלותן. מפאת היותן עשויות גומי היו הסירות מחוסנות בפני מוקשים מגנטיים ותודות למיעוט שקיעתן במים יכלו לעמוד אף בפני מוקשים ימיים רגילים. במרחק מסוים מן החוף הצרפתי, באיזור בו היתה סכנה להיתקל בספינות-משמר של האויב, היו השחינים יוצאים מן הסירות ושוחים מתחת לפני המים לנמלים שבידי האויב, ושם היו מניחים מוקשים בעל מנגנון משהה. הודות לעזרתם של השחינים



ה"בנטוסקופ"

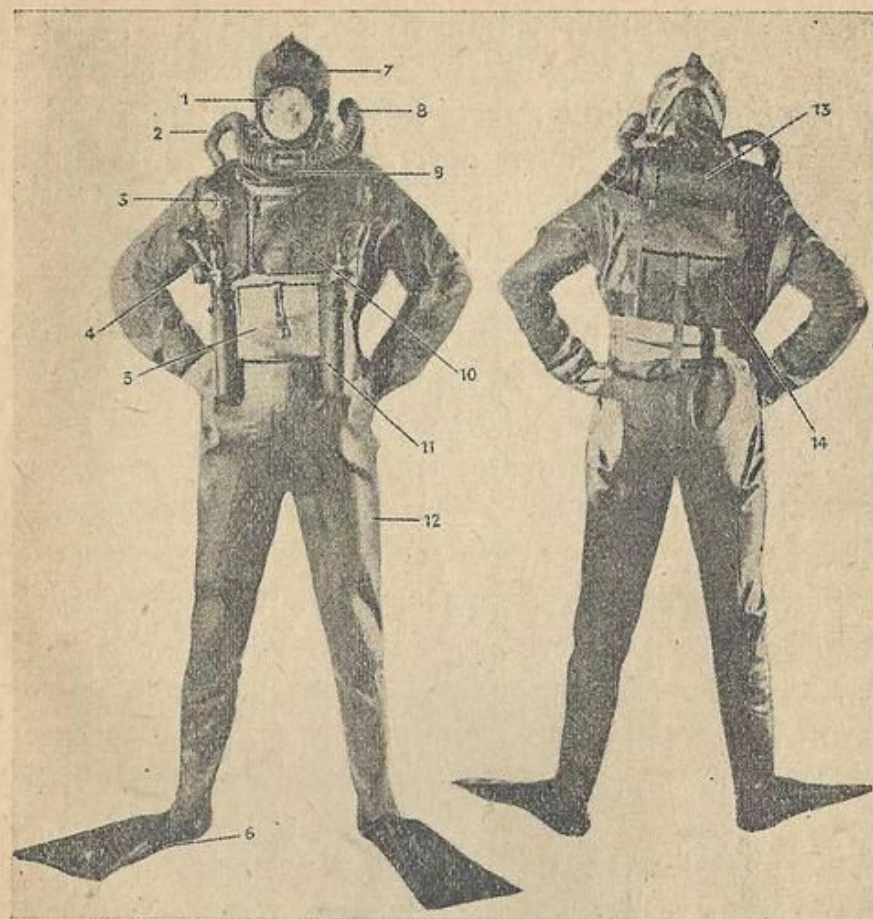


ברטון בכדור המצולות  
ה"בנטוסקופ"



התת-מימיים שגזרו בכלי-גזירה מיוחדים את כבלי המתכת של רשתות-המגן בפני צוללות, יכלו צוללות זעירות בריטיות לחדור לנמלים מבוצרים של האויב ולפגוע באניות מלחמה גדולות שעגנו שם, אך את התפקיד החשוב ביותר מילאו החטיבות הללו ביום הפלישה לצרפת. הן סילקו את המוקשים ואת מחסומי הפלדה שבמימי נורמנדיה ואיפשרו על ידי כך לספינות-הנחיתה של הברית לגשת לחופי צרפת ולהעלות שם את פלוגות המחץ שהכשירו את הקרקע לנחיתתם של הגייסות העצומים שנועדו לשחרר את מערב אירופה מידי הנאצים.

בהתאם לתפקידו שונה תלבשתו של „אדם-צפרדע“ מזו של אמודאי רגיל. האמודאי צריך להגיע לפעמים לעומק רב (למשל, כדי להוציא הפצים יקרים מתוך ספינה שטבעה), אך עבודתו מצומצמת בשטח צר. על כן צריכה תלבשתו להיות כבדה, כדי להתגבר על לחץ המים מלמטה, ומיכל החמצן צריך לספק לו אויר בלחץ גבוה. אמודאי לבוש תלבושת גומי יכול לצלול עד לעומק 90 מ'. מעומק זה צריך הוא לנשום אויר בלחץ של 10 אטמוספירות; 9 אטמוספירות לחץ המים ואטמוספירה אחת לחץ האויר שמעל למים. „אדם-צפרדע“ די לו בצלילה לעומק מועט, אך עליו לעבור מרחק ניכר. במקום לוחות העופרת הכבדים, שהאמודאי נושא על זהו ועל גבו, נושא „אדם-צפרדע“ לוחות קלים, ובמקום הנעלים הכבדות העשויות ברזל או עופרת (משקלן 10-20 ק"ג) נעולות רגליו של „אדם-צפרדע“ נעלי גומי ארוכות, רחבות ושטוחות, המקילות את חציית המים. מפאת שהייתו בעומק מועט, נושם השחיין התת-מימי אויר רגיל או במשהו למעלה מהרגיל. לשם הגנה בפני ההלם של התפוצצות תת-מימית, נושא השחיין התת-מימי מגן עשוי סיבי קאפוק, שעביו למעלה מ-25 מ"מ.



תלבשתו של שחיין תת-מימי

משמאל: מראה התלבושת מפנים. 1 — אשנב הפנים; 2 — צינור הנשיפה; 3 — שק הנשיפה; 4 — שסתום החמצן; 5 — המשקולת הקדמית; 6 — „הסגפירים“; 7 — קובע-מגן; 8 — צנור השאיפה; 9 — צוארון; 10 — שק השאיפה; 11 — צנצנת החמצן; 12 — תלבושת ספוגת גומי; מימין: מראה התלבושת מאחור. 13 — תא לטיהור האויר, המאפשר לנשום מחדש את האויר המשומש. 14 — המשקולת האחורית.



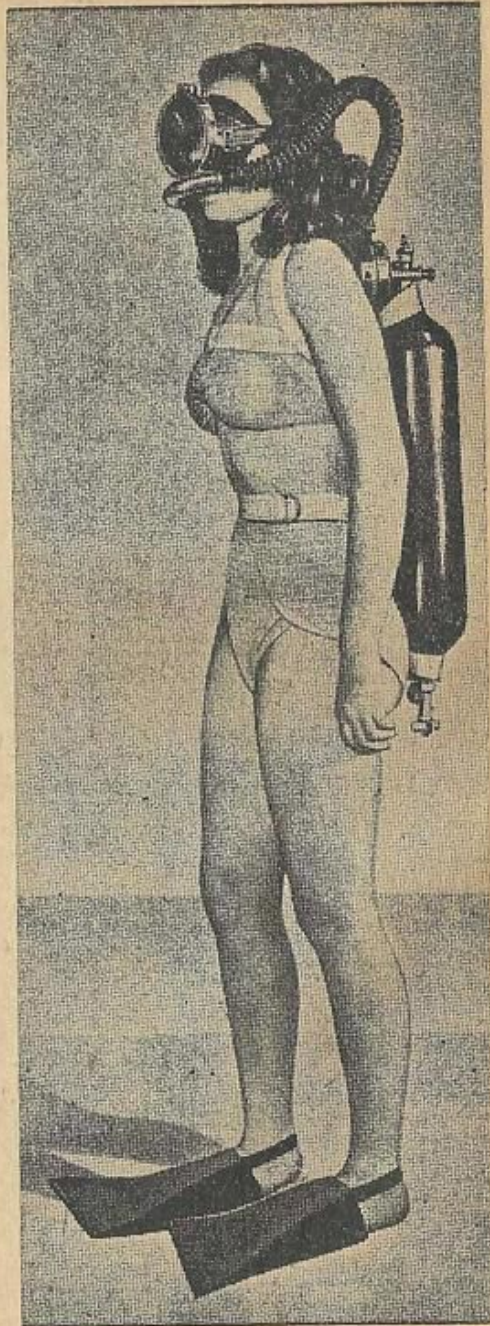
## פעולת ציוד ותיור נוף הים

בצרפת התפתח במשך 18 השנים האחרונות ספורט חדש. אנשים לבושים בגדי רחצה עוסקים בפעולות-ציוד ובספורט תת-ימיים והם נעזרים במצלמה ובמכונת-הסרטה. העומק בו הם פועלים הוא 5—20 מטרים. חלוצי הספורט הזה היו היפאנים, שבאו לתערוכה הבינלאומית בברצלונה בשנת 1930 והורו את הצרפתים לדוג דגים בעומק מועט, כשהם צוללים במים ונשארים שם שתיים עד שתיים ומחצה דקות כדרך תושבי האיים הפולניזיים, היודעים אמנות זו זה למעלה מ-2000 שנה.

המפורסם ביותר בין התיירים התת-ימיים הוא הקצין הימי קוסטו, המצטין בעוז רוחו ובחושו האמנותי כאחד. כראש-קבוצה למחקר תת-ימי בטולון, הסריט סרטים, שהנודע ביניהם הוא „18 מטר מתחת הים“.

הציידים והתיירים התת-ימיים מצוידים במסכת-זכוכית המכסה את העיניים והאף כשהיא צמודה היטב אל הפנים באמצעות מסגרת קאוצ'וק. אלה מהם השוהים במים שהייה קצרה בלבד ובעומק מועט אינם זקוקים לכלי מספק חמצן; דקה אחת הם יכולים לשהות במים בלי לנשום. אך הרוצים לשהות במים זמן רב יותר מצטיידים בצינור הבולט בכמה סנטימטרים מהמים, העשוי קאוצ'וק או מתכת. והרוצים לצלול לעומק רב יותר (עד 20 מטרים) מצוידים במכשיר המספק להם אוויר, הקרוי בשם קוסטו-גאניאן.

המכשיר קוסטו-גאניאן מורכב מצנצנת אחת או מצנצנות אחדות עשויות נתך לא-מחליד, המכילות 5 ליטרים אוויר בלחץ של 200 ק"ג לסמ"ר. את הצנצנת נושא האמודאי על הגב. בקצות הצנצנת ישנם ברזים. הברז העליון מאפשר להפעיל את המכשיר ומעליו נמצא מיתקן להורדת הלחץ שממנו יוצאים שני צינורות קאוצ'וק, לנשימה ולנשיפה המובילים לפה. המיתקן להורדת הלחץ הוא קופסה עגולה



המכשיר קוסטו-גאניאן

חלקיו העיקריים של המכשיר: הצנצנת בעלת האוויר הדחוס, שבחלקה התחתון נמצא הברז של גליל-המלאי. בחלקה העליון של הצנצנת נמצא המיתקן להורדת הלחץ ומשם יוצאים שני צינורות: האחד מביא אוויר לנשימה והשני נושא את האוויר הנשוף אל שסתום הפליטה.





למטה : גוף תת־ימי.

למעלה : ציידים תת־ימיים.

של פליו כרומי, המכילה, בנפח קטן מאוד, תא בעל לחץ גבוה ותא בעל לחץ נמוך, המסדיר את לחץ האויר בהתאם לקצב הנשימה של האמודאי והמשווה את לחץ האויר הנשום ללחץ המקיף.

הברז התחתון מפעיל את גליל־המלאי, הנמצא בתוך הצנצנת, מוגן בפני מהלומות ובפני התחמצנות. כשהלחץ יורד עד 20 ק"ג, מרגיש האמודאי כי נשימתו כבדה והולכת. יודע הוא, כי לא נותר לו אז אלא החלק העשירי מאויר־הנשימה ועל כן הוא פותח את ברז גליל־המלאי. כתוצאה מכך נעשית נשימתו קלה יותר והאמודאי עולה מתוך המים.

כל אחת מהצנצנות של מכשיר קוטסו־גאניאן מאפשרת צלילה למשך 15—50 דקה, בהתאם לעומק.

גם הצולל בעומק מועט צריך להצטייד במשקולת, כדי לעמוד בפני לחץ המים מלמטה למעלה. לשם כך הוא לובש חגורה מורכבת מכמה חטיבות עופרת שמשקלם הכללי הוא בשיעור של 3—5 ק"ג.

לפני שנתים בערך גילה ד"ר שנוה עיר רומית מתחת למי הים בקרבת האי סנט מארגאריט. מי־הים הגנו על העיר ומנעו את הריסתה הגמורה, כשם שאפר הוּזוביוס הגן על העיר פומפי.

זה שלוש שנים קיים בעיר קאן שעל חוף ים התיכון מועדון תת־ימי. תיירים אמריקאים ואנגליים, צרפתיים, סקאנדינביים, ארגנטינאים ושווייצרים באים לשם, כדי להכיר את ההוד וההדר של העולם התת־ימי.



# עצמון

מהסני ערובה בע"מ



ה ה ס נ ה  
סוכני מבס  
סוכני אגיות  
הובלה ימית  
ב ט ו ה  
טבלות מבנית



תל-אביב, רחוב לילינבלום 11 / טלפון 2485  
חיפה, רחוב הנמל 14 (בית מעדן) / טלפון 6356  
ירושלים, בניין סנסור / טלפון 5270



יצאו לאור  
בהוצאת החבל הימי לישראל

## "ספר הים"

מאת פרופ. נ. סלושץ

340 ע' עם מפות וציורים. ספר מקיף על דברי ימי השיט והספנות, למן ימי קדם ועד לימנו — המחיר: 2 ל"י

## "השחייה"

מאת מ. גלפז

201 ע' צורה אלבומית. תמונות רבות. מכיל את כל החומר על השחייה ואספורט המים, לרבות השחייה הצבאית — המחיר: 1.250 ל"י

## "מפרשי ארגמן"

ספור, מאת א. גרין, תרגום: לאה גולדברג

המחיר: 200 פרוטה

## "עקבה"

מאת י. ברסלבסקי

בצרוף מפה של מפרץ אילת — המחיר: 300 פרוטה

## "שיט מפרשים"

מאת ש. טנקוס

המחיר: 250 פרוטה

## "חבלים וקשרים"

מאת רב החובל זאב הים

המחיר: 150 פרוטה

בהזמנות לפנות:

חבל ימי לישראל, תל-אביב, רחוב אחד העם 15, ת. ד. 1917

## האנציקלופדיה העברית

נשיא הכבוד: פרופ' חיים ווייצמן

16 כרכים בתכנית גדולה הכוללים:

40.000 מאמרים כתובים בידי מאות מומחים  
בכל המקצועות של עולם העשייה והדעת,  
100.000 ערכים מפורטים באינדקס,  
5.000 מפות ואילוסטרציות אמנותיות,  
1.000 עמודות בקירוב בכל כרך.

## הופיע הברך השני

בהשתתפות:

51 עורכי מדורות ראשיים ו-205 מלומדים.  
בכרך 1000 עמודות, 27 תמונות צבעוניות  
ולמעלה מ-600 תמונות, שרטוטים ומפות.

הההתמה נמשכת.

ברבר פרטים לפנות: "מסדה"

תל-אביב ♦ ירושלים ♦ חיפה ♦ ראשון לציון ♦ הדרה





באניותינו המפליגות ברחבי  
הימים משרתים 850 ימאים  
ישראליים ועשרות צעירים  
המכשירים עצמם לעבודה  
בצי המסחרי.  
עם גידולה של הספנות  
הישראלית יידרשו ימאים  
רבים נוספים.  
החלצו לשירות בצי!

# ציים

**חנות השיט הישראלית בע"מ**



