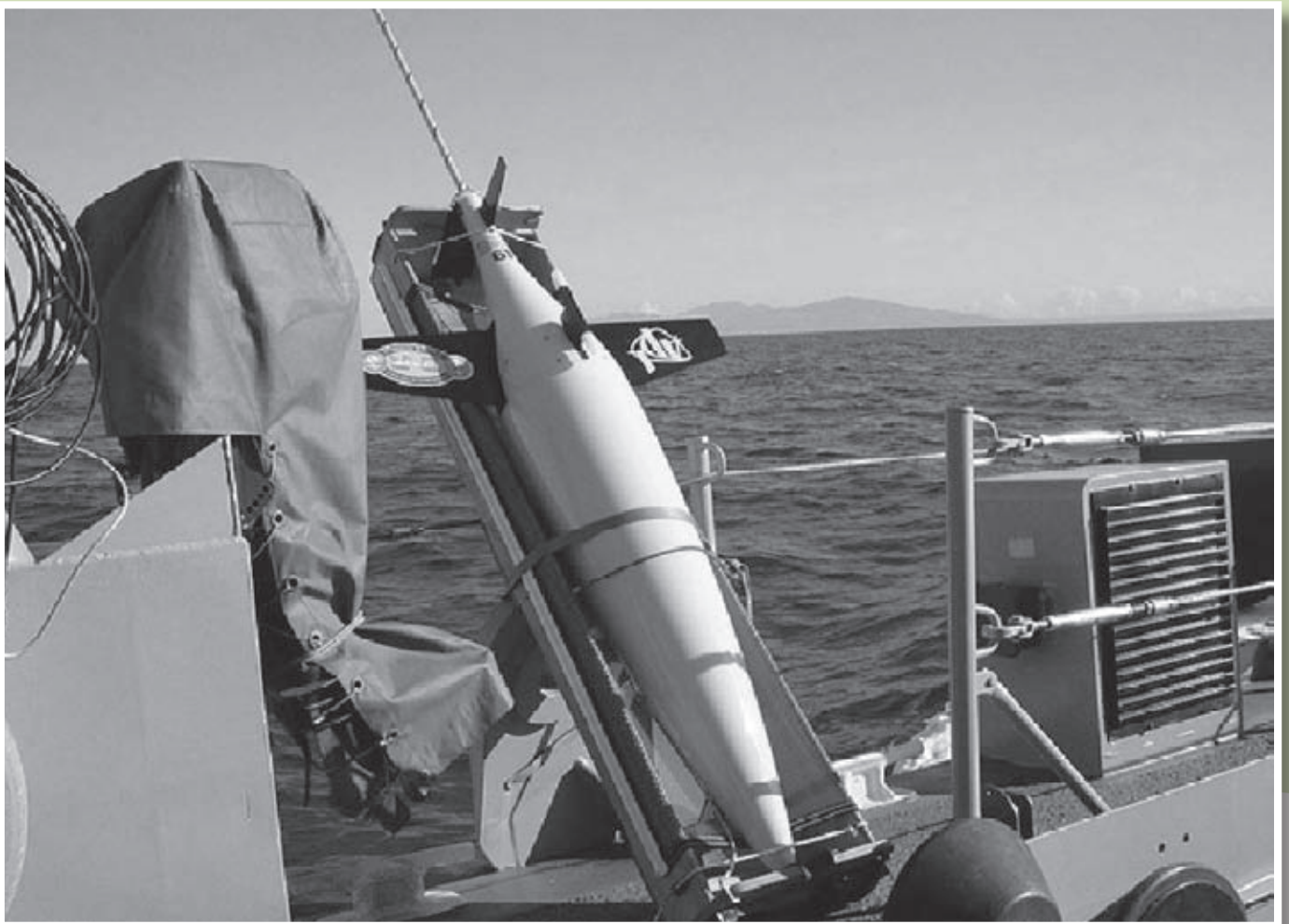


דאון תת-ימי



דאון תת-ימי מדגם Seaglider | הדאון התת-ימי
מכוסס על מערכת הנעה שמשתמשת באנרגיה
מינימלית לשינויי ציפה ולתנועה קדימה



סרן אורן גל

ראש תחום כלים אוטונומיים
בחיל הים ודוקטורנט בטכניון



כלים אוטונומיים תת־ימיים יכולים לשהות ברציפות יותר מחצי שנה מתחת למים ולעבור אלפי קילומטרים. הסוד שלהם הוא טכניקת ריחוף תת־מימית מתוחכמת שכמעט אינה צורכת אנרגיה

תקציר

כלי שיט בלתי מאוישים מעל למים ומתחתם נמצאים כיום בתנופת פיתוח בעולם ועתידים למלא בעתיד משימות רבות הן בתחום המחקר האוקיינוגרפי והן בתחום הביטחוני. התווך התת־ימי טומן בחובו מספר רב של אתגרים טכנולוגיים במגוון רחב של משימות. אחד מהם הוא הצורך להקנות לכלי השיט האוטונומיים יכולת לפעול באופן עצמאי במשך זמן רב. הצורך הזה הוא קריטי במשימות המיועדות לפלטפורמות האלה בשל ממדי התווך ובשל קשיי השליטה והתקשורת בו.

המאמר הזה מציג את עקרונות הפעולה ואת שימושי האפשריים של דאון תת־ימי (Glider). הפלטפורמה הזאת היא סוג של כלי שיט תת־ימי בלתי מאויש (Autonomous Underwater Vehicle - AUV) המבוסס על עקרון שינוי הציפה של הפלטפורמה בשילוב הזאת כנפיים. בכך מומרת בעילות התנועה האנכית לתנועה אופקית.

הדאון התת־ימי מבוסס על מערכת הנעה שמשמשת באנרגיה מינימלית לשינוי ציפה ולתנועה קדימה. הוא נע לאט יותר מכלי שיט תת־ימיים בלתי מאוישים סטנדרטיים המונעים באמצעות מנועים חשמליים, אך טווח הפעולה שלו מגיע לאלפי קילומטרים, והוא מסוגל לשהות מתחת למים ברציפות עד חצי שנה.

מבין היתרונות שיש למערכים בלתי מאוישים, היתרון הבולט ביותר הוא היכולת למלא משימות "משעממות" במשך זמן רב ללא מעורבות מפעיל. לחלק מן המערכים האלה יש כבר היום יכולת לקבל החלטות באופן עצמאי



רקע

בכל העולם מושקעים בשנים האחרונות משאבים רבים בפיתוח כלים בלתי מאוישים בתווך הימי לשני שימושים: מחקר וביטחון. כדי לאפשר שימוש נרחב בכלים האלה יש להתמודד עם אתגרים טכנולוגיים רבים הכרוכים בהפעלתם. המטרה המרכזית של אנשי המחקר והפיתוח בתחום הזה היא לפתח יכולות גרורות שיאפשרו לכלים האוטונומיים לבצע משימות רבות ככל האפשר בעולם התת־ימי.¹ שתיים מאבני הבניין הטכנולוגיות הבסיסיות בכלים בלתי מאוישים הן האנרגיה והיעילות. האתגרים הטכנולוגיים האלה משותפים לעולם הכלים הבלתי מאוישים בים, באוויר וביבשה,² והם כיום תחום מרכזי גם בעולם האזרחי.

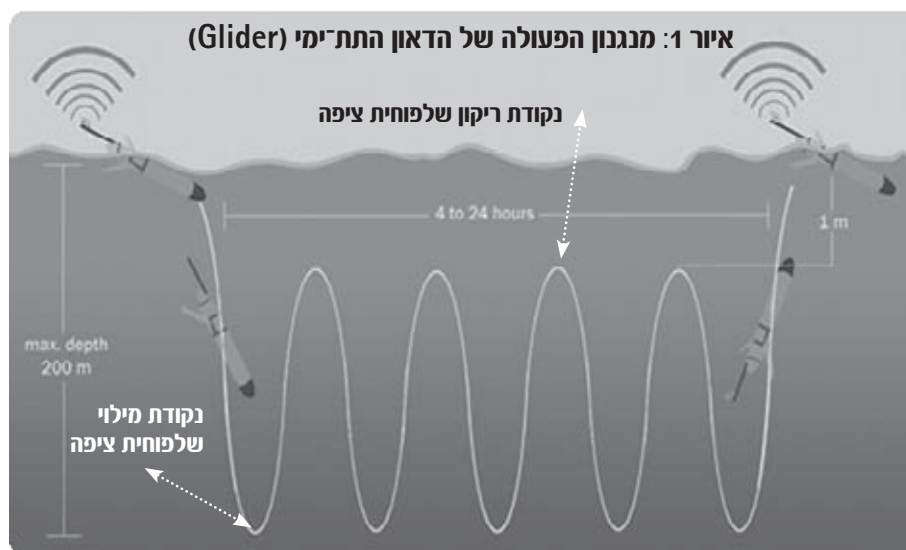
מבין היתרונות שיש למערכים בלתי מאוישים, היתרון הבולט ביותר הוא היכולת למלא משימות "משעממות" במשך זמן רב ללא מעורבות מפעיל. לחלק מן המערכים האלה יש כבר היום יכולת לקבל החלטות באופן עצמאי (יכולת פעולה אוטונומית), ובעתיד עוד תלך ותשתכלל היכולת הזאת. במילים אחרות: דפוס ההפעלה של כלים בלתי מאוישים הוא עבודה רצופה למשך זמן רב ומעורבות מינימלית של אדם בחוג. אחד השימושים הנפוצים בעולם במל"טים - איסוף

מודיעין - דורש זמן שהייה באוויר ארוך ככל האפשר מעל היעד כדי להשיג כיסוי תמידי. בעיית האנרגיה מתעצמת כאשר מדובר בכלים תת־ימיים. בתווך הזה קשה לאסוף אנרגיה ממקורות חיצוניים במהלך מילוי המשימה. בתווך האווירי, לשם השוואה, ניתן לנצל את אנרגיית השמש, ואילו בתווך הקרקעי ניתן לטעון את הכלים תוך כדי מילוי המשימה באמצעות נקודות טעינה מסודרות שהוצבו מראש.

בדאון התת־ימי נפתרה בעיית האנרגיה בתווך התת־ימי באמצעות קונספט חדשני. הקונספט הזה, שיוצג בהמשך, מאפשר לו לפעול הרבה יותר זמן ולעבור מרחקים גדולים הרבה יותר מאשר כלים שמונעים בשיטות הנעה קונוונציונליות.

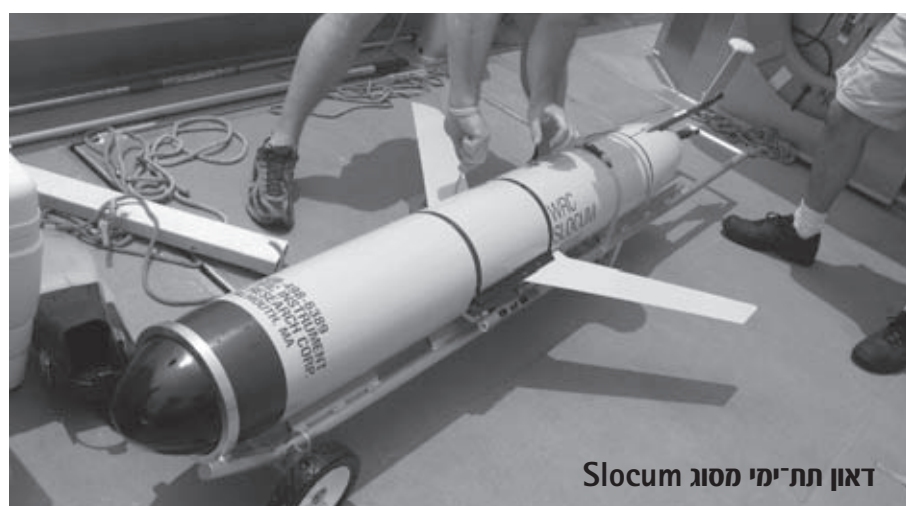
בתווך האווירי נעשה שימוש בדאונים במלחמת העולם השנייה לשם הנחתת כוחות מוטסים בעומק שטחו של האויב. הדאונים המשוכללים של ימינו דומים למטוסים קלים, ומתאפיינים במוטת כנפיים גדולה, יחסית לגודל הגוף. הם מסוגלים לדאות שעות רבות וגם להתרומם לגובה רב יותר מהגובה שבו התחילה הדאייה. הדבר נעשה באמצעות דאייה על זרמי אוויר חם העולים כלפי מעלה. הדאון האווירי משמש כלי טיס ספורטיבי. אין לו כיום שימושים צבאיים, שכן דאונים רבים היו מעורבים בתאונות. זוהי פלטפורמה בעלת חסרונות רבים בתווך האווירי, אך הנצילות האנרגטית שלה היא מצוינת.

ה־Glider הוא בעצם דאון תת־ימי. כמו הדאון, משתמש ה־Glider בתכונה הבסיסית שלו - לשקוע במים - ומשתמש בשינוי תצורת הכנפיים כדי להמיר את אנרגיית השקיעה לאנרגיית תנועה אופקית. ההבדל המהותי בין הדאון ל־Glider הוא מנגנון התנועה המופעל כאשר הפלטפורמה מגיעה לנקודה הנמוכה ביותר במסלולה או לנקודה



העמוקה ביותר ביחס לפני המים. הדאון פשוט נוחת (או מפעיל מנועים ומטפס חזרה) ואילו ה-Glider משנה את הציפה שלו ובכך משתנה עומק הפלפורמה.

בדור הראשון של פיתוח ה-Glider נעשה שינוי הציפה באמצעות שחרור משקולת מהפלפורמה, וכך צף הכלי בחזרה לפני המים. כבר בשלבי הפיתוח הראשוניים האלה השתמשו ב-Glider כדי למדוד מערבולות בתוך המים בגלל אופיו השקט (שהרי אין לו מערכת הנעה מרעשה) ומשום שהוא עצמו לא יוצר מערבולות. תכונותיו אלה איפשרו לו לקיים מדידות איכותיות הרבה יותר מהאמצעים האחרים שעמדו לרשות החוקרים.



עקרון התנועה של הדאון התתימי

כדי להאריך את השהות מתחת למים (יותר ממחזור אחד של שקיעה ושל ציפה), הוכנסה ל-Glider מערכת יעילה לשינוי ציפת הכלי המאפשרת לו לחזור על מחזור התנועה שלו פעמים רבות (כל עוד נשארת די אנרגיה בעבור המנגנון לשינוי הציפה).

המנגנון לשינוי הציפה פועל כיום על פי אחת משתי הדרכים הבאות: שינוי מסת ה-Glider באמצעות הוצאת מים מגוף הכלי, או, לחלופין, שינוי נפח ה-Glider באמצעות ניפוח וריקון של שלפוחית שמן הממוקמת מחוץ לגוף ה-Glider, אך היא חלק אינטגרלי מהפלפורמה. לדוגמה, כדי לשקוע שואב ה-Glider את השמן מהשלפוחית החיצונית. בדרך למטה נע ה-Glider קדימה בעזרת כנפיו. כדי לצוף שוב כאשר מגיע ה-Glider לסוף מסלולו, הוא מנפח את השלפוחית שמחוץ לגופו וצף בחזרה לפני המים. לאורך כל הדרך נעשית אותה הפעולה שנעשתה בירידה וכך מתקדם ה-Glider תוך כדי עלייתו כלפי מעלה, כפי שהוא מתקדם תוך כדי ירידתו מטה.

שינוי הציפה מושג באמצעות שימוש בכמות מזערית של אנרגיה (בהשוואה לאנרגיה שהיה צריך להשקיע אילו הוא התקדם בעזרת מנוע חשמלי), וכך יכול ה-Glider "לדאות" עוד ועוד באמצעות שימוש בכמויות אנרגיה מזעריות.

שיטת ההנעה הזאת גורמת לכך ש ה-Glider מתקדם בצורה הדומה לשינוי מסור (ראו איור 1). כיוון ששינוי הנפח הוא מאוד קטן, תכן הפלפורמה מבחינה מבנית והידרודינמית הוא ייחודי לנתוני הסביבה הימית שבהם מופעל הכלי. מאחר שציפת הכלי קטנה מאוד (דהיינו טווח התנועה של הכלי למעלה ולמטה), מתקבלת מהירות נמוכה יחסית של כחצי קשר. בעזרת טכניקת התנועה הזאת יכול ה-Glider להגיע לטווחים עצומים של אלפי קילומטרים (כמה כלים ברחבי העולם הצליחו לעבור יותר מ-3,500 ק"מ) במהלך משימות שנמשכו חצי שנה ואפילו יותר ללא טעינה וללא התחברות למקור אנרגיה חיצוני כלשהו.

כיום קיימים שלושה סוגים מרכזיים של פלפורמות Glider המבוססים על מנגנון חשמלי לשינוי הציפה ושכבר הוכיחו את יכולותיהם בניסויים בים: ³ "סלוקום" (Slocum) של Webb Research Corporation, "ספריי" (Spray) של Scripps Institution of Oceanography ו-Seaglider של אוניברסיטת וושינגטון.

מדובר אפוא בשלושה כלים שונים מתוצרת שלוש קבוצות מחקר. הכלים שונים זה מזה במקצת בתכונותיהם כמו עומק צלילה וסוגי החיישנים המותקנים עליהם, אך בשלושתם נעשה שימוש בסוללה חשמלית סטנדרטית כדי להפעיל משאבת שמן שממלאת או מרוקנת את השלפוחית החיצונית לשינוי הציפה.

העיקרון שבו משתמשים כדי לנצל את אנרגיית החום הוא תכונתם הבסיסית של חומרים להתרחב בחום ולהתכווץ בקור. לשם כך מכניסים לתוך ה-Glider חומר דמוי שעווה. בעזרת התרחבותו "טוענים" בכל עלייה את מנגנון התנועה. מכניסים מראש מכל גז דחוס (בלחץ הגבוה מהלחץ של המים בעומק המרבי שבו מיועד ה-Glider לפעול) לתוך הפלטפורמה ומכניסים את ה-Glider למים. באותו השלב הציפה של ה-Glider היא שלילית, והוא שוקע. בעזרת כנפיו הוא ממיר חלק מהאנרגיה לתנועה אופקית. כאשר מגיע ה-Glider אל תחתית מסלולו, הוא משחרר שסתום ומאפשר לגז הדחוס לדחוף שמן ולמלא שלפוחית חיצונית - מה שמגדיל את הציפה שלו ומאפשר לו לצוף.

בדרך למעלה ממשיך ה-Glider לנוע בצורה אופקית ולהתקדם. ככל שה-Glider עולה, מתחממת השעווה ומתרחבת, ועם התרחבותה דוחסת את הגז בחזרה לתוך המכל ובעצם "טוענת" אותו לקראת המחזור הבא.

כאשר ה-Glider מגיע לשיא הגובה (או לפני הים) ועליו לחזור לצלול, הוא משחרר שסתום שמחזיק את השמן בשלפוחית החיצונית (שעשויה מחומר אלסטי), והשמן נדחף בחזרה אל תוך ה-Glider (במצב הזה אין לחץ של המים, ולא צריך להשקיע אנרגיה נוספת על זו האגורה בשלפוחית החיצונית). כך קטן נפח ה-Glider והוא שוקע בחזרה, והמחזור מתחיל מחדש.

השימושים

תכונות ה-Glider ועקרונות הפעולה שלו שנידונו לעיל הופכות אותו לכלי שמתאים למשימות באזורים מרוחקים הנמשכות זמן רב:

כוח קדמי. ניתן לשלוח Glider לאזור עוין מרוחק כדי לאסוף מידע בנוגע לנתוני הסביבה הימית לקראת הגעת הכוחות.⁶
גילוי מוקשים. בעזרת שילוב של חיישנים ייחודיים לזיהוי חומרים מתכתיים יכול ה-Glider לשמש כלי עזר לזיהוי שדות מוקשים. זהו אחד הנושאים המרכזיים שבהם יעסוק הצי של ארה"ב בשנים הקרובות.⁷

איור 2: המבנה הפנימי של ה-Glider

הסוללות משנות את מיקומן וכך הן משנות את מרכז הכובד של הכלי - מה שמאפשר לו לתמרן



מערכת ההיגוי

אחד החידושים המשמעותיים ב-Glider הוא הפיכת הסוללות של הכלי למערכת ההיגוי. היגוי הכלי נעשה באמצעות שינוי מרכז הכובד שלו באמצעות שינוי המיקום של הסוללות בתוך גוף הכלי, ואילו מרכז הציפה נשאר קבוע. המרחק בין נקודות המרכז האלה מאפשר את העלרוד (העלאת "האף" למעלה לשם עלייה או הורדתו לשם ירידה). באמצעות הזזת הסוללות מהציר המרכזי מתאפשר סיבוב הכלי. באמצעות שתי התנועות האלה: למעלה - למטה וימינה - שמאלה אפשר לכוון את ה-Glider לכל כיוון.

שינויי הכיוון נעשים אפוא באמצעות שינויים עדינים במרכז הכובד ובציפה. ב-Glider שמשנה את הציפה שלו באמצעות שלפוחית, ניתן לתכנן את הפלטפורמה כך שכאשר תמולא השלפוחית בשמן, יוסט מרכז הציפה לכיוון הירכתיים אל מעבר למרכז הכובד, וה-Glider ייטה כלפי מעלה. כאשר תרוקן השלפוחית, יחזור מרכז הציפה לעבר החרטום ויעבור שוב את מרכז הכובד, וכך תתקבל נטייה כלפי מטה. בשני המקרים תושג הנטייה הרצויה כדי להתקדם בציר האופקי.

תקשורת וניווט

כדי לנווט משתמש הכלי במערכת GPS. באמצעותה הוא מעדכן את יעדיו בסיום כל מחזור צלילה, כאשר מגיע ה-Glider לגובה פני המים. אז מוציא ה-Glider את האנטנה שלו הממוקמת בכנפיים ("ב"ספריי") או בסנפיר הזנב ("ב"סיגליידר" וב"סלוקום") ומתעדכן בנתוני ה-GPS. נוסף על סנכרון אות GPS בעזרת תקשורת לוויינית משתמש ה-Glider בחיישני אוריינטציה לעומק ולגובה כדי למדוד באופן מדויק את מיקומו בזמן הצלילה (עד לקבלת עדכון מה-GPS במחזור התנועה שלאחר מכן).

בכל סיום מחזור מפעיל ה-Glider תקשורת לוויינית, מעדכן את GPS ומקבל פרטי משימה חדשים - אם ישנם - ומעדכן את תחנת החוף במידע זה.⁴

Glider תרמי

כפי שהוסבר עד כה, בעזרת עקרון התנועה, המבוסס על שינוי ציפה של ה-Glider, ניתן להאריך את שהות הכלי מתחת למים באופן משמעותי. אולם שינוי הציפה צורך אנרגיה רבה בעומק רב בשל הלחץ העצום שמפעילים המים. בגלל הלחץ הזה נדרש כוח רב יותר לשינוי הציפה של הכלי. התוצאה היא השקעת אנרגיה רבה יותר - מה שמקטין את משך המשימה. כדי להגדיל את נצילות האנרגיה נעשה שימוש בלחץ שמופעל על הכלי עם הירידה לעומק. השיטה מבוססת על תופעת טבע בסיסית: השתנות הטמפרטורה ככל שמעמיקים.⁵



איור 3: קונספט לפיתוח Glider המאפשר שילוח סנסור מהפלטפורמה

כיום כבר קיים אב־טיפוס בתצורה הזאת, ומשולבת בו גם מערכת הנעה נוסף על יכולת הדאיה במים. תכן מתקדם ושילובה של מערכת ההנעה מקנים לכלי את אחד מיתרונותיו הבולטים: היכולת לנוע בקרבת החוף ובנמלים, לשקוע בקרקעית לערוך בדיקות שונות ולחזור לפני השטח. כאמור, בשל צורתו יכול ה־Glider הזה לכסות שטחים גדולים יותר מסוגי ה־Glider הסטנדרטיים. מובן שבשל יכולתו לנוע בצורה עצמאית יכול ה־Glider הזה למלא מגוון רחב יותר של משימות שבהן דרושה יציבות, למשל תנועה תוך כדי שמירה על עומק קבוע.

קבוצת פלטפורמות מסוג Glider

בשל מחירן הזול יחסית של הפלטפורמות האלה ישנה כיום מגמה בקרב כל החוקרים בעולם להפעיל אותן בתצורת נחיל, דהיינו בקבוצות גדולות. התצורה הזאת מתאימה במיוחד למשימות כמו סריקות או יצירת רשת תקשורת תת־מימית וחיבורה לרשת הלוויינית. במשימות קבוצתיות יש יתרון ניכר לפלטפורמות שיכולות לנוע באופן עצמאי. היכולת הזאת מאפשרת להן לתמרן בקרבת פריטים אחרים בקבוצה (במקרה שהן נעות במסלול התנגשות)

מערכת ההנעה של הפלטפורמה היא פנימית ואינה מכילה פרופלור או חלקים חיצוניים נעים. בשל כך הכלי כמעט שאינו משאיר חתימה אקוסטית, וקשה מאוד לגלות אותו



או לעשות פעולות מורכבות ביחד (למשל, לנטרל מוקשים). מכאן החשיבות הרבה של הדור החדש של הפלטפורמות האלה שיש להן יכולת לנוע באופן עצמאי.⁹ התחום הזה נמצא בחזית המחקר האוקיינוגרפי וללא ספק ישנה את היכולות בתחום המיפוי והשליטה במרחב התת־ימי.

סיכום

פלטפורמת ה־Glider היא מושלמת למשימות ארוכות טווח - בין אם לחקר האוקיינוסים ובין אם למשימות ריגול צבאיות. בשל טווחי הפעולה הגדולים שלו, החתימה האקוסטית המזערית ומחירו הזול קיימת התעניינות רבה ב־Glider לחקר האוקיינוסים (והקטבים) בעקבות שינויי

תקשורת וחשאיות. מערכת ההנעה של הפלטפורמה היא פנימית ואינה מכילה פרופלור או חלקים חיצוניים נעים. בשל כך הכלי כמעט שאינו משאיר חתימה אקוסטית, וקשה מאוד לגלות אותו. החתימה האקוסטית הזניחה שלו גם מאפשרת לו לאסוף מדידות אקוסטיות. הפלטפורמה יכולה להישאר "רדומה" בנקודת מפתח ו"להתעורר" בזמן שיהיה בה צורך. נוסף על כך ניתן - באמצעות שילוב של חיישנים מתאימים - ליצור רשת תקשורת תת־מימית באמצעות קבוצת כלים.



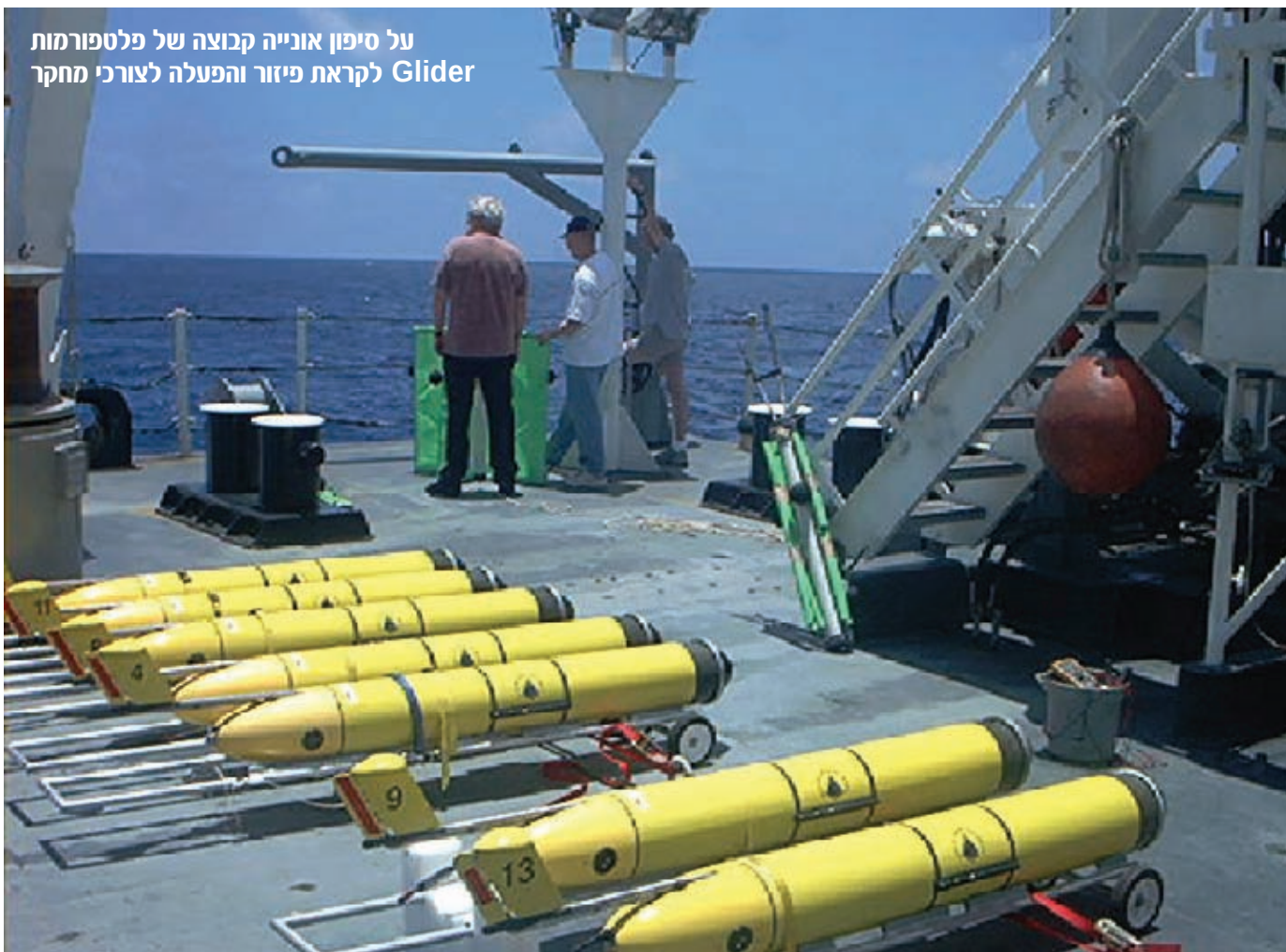
הצי של ארה"ב התניע פרויקט כזה לפריסת מאות פלטפורמות מעין אלה לרשת תקשורת תת־ימית.

אוקיינוגרפיה. בשל תכונותיו הבסיסיות - יכולתו לגמוא מרחקים גדולים ולשהות זמן רב מתחת למים - ה־Glider הוא כלי אידיאלי למדידות של תכונות האוקיינוסים כמו זרמים וטמפרטורות. פלטפורמות כאלה משמשות אפילו למדידות מתחת לשכבת הקרח בקטבים. באחרונה נעשה שימוש בפלטפורמות כאלה כדי לחקור כיצד משפיעה התחממות כדור הארץ על הקטבים.⁸

פלטפורמות עתידיות

בכל העולם מושקע היום מאמץ לשדרוג יכולותיהן של הפלטפורמות האלה. אחת הדרכים הבסיסיות לעשות זאת היא להפחית את הגרר (התנגדות המים לתנועת הכלי). בין היתר מנסים לעשות זאת באמצעות בניית פלטפורמות טבעיות, שכן התברר שהמבנה הזה מפחית באופן משמעותי את הגרר ומאפשר תנועה מהירה יותר וחסכונית יותר באנרגיה.

על סיפון אונייה קבוצה של פלטפורמות Glider לקראת פיזור והפעלה לצורכי מחקר



האקלים וההתחממות הגלובלית. במקביל נעשים בעולם מחקרים רבים לשילוב הפלטפורמה הזאת בחילות הים למילוי מגוון של משימות.

תודות לקמ"א יאיר שטרן על עזרתו בכתיבת המאמר הזה

הערות

1. סא"ל אוהד אבילאה, "מפת דרכים טכנולוגית לכלי שיט בלתי מאוישים", **כנס AUVSI**, אוניברסיטת באר-שבע, 2010; סרן אורן גל, "אתגרם בפיתוח כלי שיט בלתי מאוישים", **טכנולוגיות**, מאי 2010, www.technologies.co.il/beta/Page.aspx?Id=706; סרן אורן גל, "פערי מחקר בתחום כלי שיט תת-ימיים בלתי מאוישים", **כנס AUVSI**, אוניברסיטת באר-שבע, 2010; **The U.S. Navy Unmanned Undersea Vehicle (UUV) Master Plan**; www.navy.mil/navydata/technology/uuvmp.pdf
2. תא"ל (מיל) יעקב נגל, "מפת דרכים ברובוטקה ביטחונית", **סדנת תל-אביב למדע, לטכנולוגיה ולביטחון**, כנס 52
3. National Oceanography Centre, UK. Glider Home Page, www.noc.soton.ac.uk/omf/glider/; Seaglider Homepage, www.apl.washington.edu/projects/seaglider/summary.html; Spray glider Homepage, <http://spray.ucsd.edu/pub/tel/index.php>
4. R. Moitie and N. Seube, "Guidance and Control of an Autonomous Underwater Glider", in **Proceedings, 12th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology**, Durham, NH, 2001
5. D. C. Webb, P. J. Simonetti and C. P. Jones, "SLOCUM: An Underwater Glider Propelled by Environmental Energy", **IEEE, Journal of Oceanic Engineering** 26, 2001, pp. 447-452
6. יעקב נגל, **ישם**

7. ראו הערה 1

8. C. C. Eriksen, T. J. Osse, R. D. Light, T. Wen, T. W. Lehman, P. L. Sabin, J. W. Ballard and A. M. Chiodi, "Seaglider: A Long Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research", **IEEE, Journal of Oceanic Engineering**, Vol. 26, No. 4, 2001, pp. 424-436
9. T. B. Curtin, J. G. Bellingham, J. Catipovic and D. Webb. 1993. "Autonomous Oceanographic Sampling Networks", **Oceanography** 3, 1993, pp. 86-94, N. E. R. Leonard, P. Bachmayer, E. Bhatta, D. Paley, D. Fiorelli, D. Paley and D. M. Fratantoni, "Design and Implementation of Multi-AUV Control Methodologies for Adaptive Sampling in a Dynamic and Uncertain Environment", **IEEE, Oceanic Engineering Society, Autonomous Underwater Vehicles**, 2004, Sebasco Estates, Maine