



# ארכיטקטורה של ניהול שרשרת אספקה ולוגיסטיקה בין-כוכבית

חקר חלל מעמיק לא יתאפשר ללא ניהול שרשרת אספקה בין-כוכבית מתאימה. אם במשימות "אפולו" (Apollo), המטען כולו הועמס על החלליות ששוגרו לחלל, הרי מחקרי חלל עתידיים יצטרכו להסתמך על רשתות אספקה מורכבות יותר שיתפרסו, לדוגמה, מן כדור-הארץ, דרך מעבורת החלל (Space Shuttle) ותחנת החלל הבין-לאומית (International Space Station) [להלן - "ISS"] עד למוצב על הירח, ואפילו עד לתחנת מחקר על כוכב הלכת מאדים (מארס)

רווה כהנר ואלי יצחקוב

(Institute of Technology) [להלן - "MIT"] את "פרוייקט לוגיסטיקה בחלל" (MIT Space Logistics Project), שמטרתו לעצב את הארכיטקטורה של ניהול שרשרת האספקה והלוגיסטיקה הבין-כוכבית (Interplanetary Supply Chain Management and Logistics Architectures) [להלן - "IPSCM&LA"]. השותפים הנוספים בפרוייקט זה הם: המעבדה לכוח הנעה סילוני/מכון קליפורניה לטכנולוגיה (Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology), ברית החלל המאוחדת (United Space Alliance), וחברת Payload System Inc., המספקת שירותים הנדסיים ומדעיים בפרוייקטים של חלל, של יבשה ושל תת-ים.

## עיצוב שרשרת אספקה בין-כוכבית התומכת בחקר החלל

המטרה העיקרית של פרוייקט IPSCM&LA היא לפתח מסגרת של הנחיות לבניית יכולת לוגיסטית משולבת בשרשרת אספקה בין-כוכבית, אשר תאפשר את ביצועם של מחקרי חלל במערכת ארץ-ירח-מאדים (Earth-Moon-Mars System), ואף מעבר לכך. תהליך בניית היכולת הלוגיסטית המשולבת בשרשרת האספקה הבין-כוכבית, מבוסס על ארבעת הצעדים הבאים:

### 1. אנלוגיה לשרשרת אספקה מקבילות

צוות פרוייקט לוגיסטיקה בחלל [להלן - "צוות הפרוייקט"] חקר שרשרת אספקה בעלות מאפיינים, הדומים למאפיינים של שרשרת האספקה הבין-כוכבית, והשווה ביניהן.

מאז מלחמת העולם השנייה, המגזרים הפרטי והצבאי פיתחו עקרונות מדעיים רבים וטכנולוגיות רבות לשיפור האפקטיביות של שרשרת האספקה, ולשיפור יעילותן. עם זאת, התועלת האפשרית של הידע, שהצטבר עם התפתחותן של שרשרת האספקה, עדיין לא מומשה דייה בהקשר של חקר החלל.

סוכנות החלל האמריקנית (National Aeronautics and Space Administration) [להלן - "NASA"] יזמה עם מכון מסצ'וסטס לטכנולוגיה (Massachusetts)



חדר הבקרה



דפנות המעבורת פתוחות, כדי לאפשר את העברת המטען אל תחנת החלל

- בסיס יומי למרכזי השליטה והבקרה בארה"ב וברוסיה.
- יש להביא בחשבון את דרישות הלוגיסטיקה החוזרת (Return Logistics) של ציוד, דגימות מחקר, ממצאים מן השטח, פסולת, אשפה, וכו'.

## 2. ניתוח רשת לוגיסטית בחלל

- צוות הפרוייקט בנה מודל של רשת לוגיסטית משולבת בחלל, כדי לתאר את המסלולים האפשריים להעברת מטען (ואנשי צוות) בין נקודות בחלל.
- העברת המטען לעיל יכולה להתבצע באחת מן הצורות הבאות:
- **העברת מטען לצורך פריסה מוקדמת (Pre-Deployment)**, כגון שיגור תשתיות לחלל, אשר ישמשו מאוחר יותר את צוות המחקר. ולדוגמה, מערכות שישוגרו למאדים ויחלו לייצר דלק, אוויר ומים מן האטמוספירה, כשנתיים לפני שיגור אנשי הצוות למקום.

המטרה העיקרית של פרויקט IPSCM&LA היא לפתח מסגרת של הנחיות לבניית יכולת לוגיסטית משולבת בשרשרת אספקה בין-כוכבית, אשר תאפשר את ביצועם של מחקרי חלל במערכת ארץ-ירח-מאדים (Earth-Moon-Mars System), ואף מעבר לכך

- **העברת מטען עם אנשי הצוות (Carry-along with the Crew)**, כגון: מזון, ציוד רפואי, ציוד מחקר, וכו', המשוגרים במעבורת החלל.
- **העברת מטען מתוכננת, או אספקה מחדש על פי דרישה (Scheduled or Demand Re-supply)**, כגון הובלת מטען לתחנת חלל, או לכוכב, במועד מתוכנן מראש; או בתגובה על דרישה מיוחדת (למשל, עקב תקלה בלתי צפויה).

ניתוח הרשתות הלוגיסטיות מלמד, כי רשת תעבורה ארצית מכילה מיקומים פיזיים, כגון אתרים או צמתים, וכבישים המקשרים ביניהם; ולעומתה, רשת תעבורה בחלל מכילה נקודות ציון, כגון: מסלולי הקפה (Orbits), או נקודות שיווי-משקל בין מסות סמוכות (Lagrange Points), ומסלולי תנועה קשתיים (Arcs) המקשרים ביניהם.

כאשר מתכננים רשת לוגיסטית בחלל, צריך להביא בחשבון שני סוגים של רשתות כדלקמן:

- א. רשת סטטית (Static Network).
- הרשת הזאת כוללת נקודות ציון (Nodes) כלהלן:
  - מיקומים על פני גופים, כגון כדור הארץ, או הירח (Body Nodes).
  - מסלולי הקפה (Orbits Nodes), כגון מסלול סביב כדור הארץ (Low

להלן דוגמאות לשרשרות האספקה שנבחנו:

- שרשרות אספקה תעשייתיות, הידועות ב**מורכבותן הגבוהה**, ובעיקר, בתעשיות המייצרות מוצרים עתירי הון ובכמויות קטנות.
- שרשרות אספקה צבאיות הפועלות ב**טווחים ארוכים**, כגון נושאות מטוסים וצוללות, הפועלות הרחק מן נמל הבית.
- שרשרות אספקה, המתבצעות ב**תנאי סביבה קשים**, כגון: פרויקטי מחקר בקוטב הצפוני; פרויקטים של חקר גז ונפט, המתבצעים על אסדות קידוח בלב ים; ופרוייקט NASA, המדמה את תנאי הסביבה על המאדים (Houghton-Mars Project) (להלן - "HMP").

נוסף על כך, צוות הפרוייקט ניתח לקחים לוגיסטיים, אשר סוקרו ונחקרו בטיסות NASA לחלל, כגון בדו"ח: "Logistics Lessons Learned in NASA Space Flight", NASA/TP-2006-214203, May 2006.

הדו"ח כולל שבעה לקחים לוגיסטיים עיקריים, ולדוגמה:

- יש לעצב את צורת האחסון (Storage) המתאימה למעבורת החלל, כדי לאפשר גישה נוחה לציוד ולמנוע פגיעה במרחב התפעולי של המעבורת.
- **הערה:** מעבורת חלל מכילה מיכל לוגיסטי רב-תכליתי (Multi-Purpose Logistics Module) (להלן - "MPLM"), המאפשר צורות אחסנה שונות, בהתאם לאופייה של משימת החלל.
- מערכת ניהול המצאי (Inventory System) צריכה להתבסס על מערכות לוגיסטיות משותפות.
- **הערה:** מערכת המצאי ב-ISS מנהלת מצאי ומלאי, הממוקמים באתרי אחסון שונים, בתחנת החלל. המערכת מקושרת למערכות אלחוטיות אחרות בתחנה (מחשבים ניידים וסורקי בר-קוד), והיא משדרת נתונים על



שיגור מעבורת חלל



המיכל הלוגיסטי מועבר אל תחנת החלל באמצעות זרוע מנוף

[להלן - "COS"]. רשימת ה-COS למשימות החלל, כוללת 10 סיווגים שונים, ולדוגמה: חומרי נפץ ודלקים (Propellants and Fuels), כלכלת אנשי הצוות (Crew Provisions), תחזוקה (Maintenance and Upkeep), אחסנה ועגינה (Stowage and Restraint), ציוד מחקר ובדיקה (Exploration and Research), פינוי פסולת (Waste Disposal), ועוד. כל אחת מן הקטיגוריות לעיל היא בעלת אופי שונה של אספקה, המחייבת תכנון אספקה מתאים.

**4. בחינה כלכלית של ארכיטקטורת שרשרת האספקה הבין-כוכבית**

צוות הפרוייקט בוחן את שילוב המודלים של רשתות ביקושים-אספקות עם המודלים הלוגיסטיים בחלל, הקיימים במעבורת החלל ובתחנת החלל הבין-לאומית. הבחינה כוללת בדיקות כלכליות, כגון: כדאיות אינטגרציה מאונכת (Vertical Integration) באתר השיגור על-פני כדור הארץ, לעומת כדאיותה ב-LEO; אפשרויות שינוע במודלים שונים של העברה; מיקום אופטימלי של תשתיות, כמו נקודות אחסון ביניים ברשת החלל; מודלים של דחיפה/משיכה; השוואה של חלופות, כמו: הצבה מוקדמת של מטען בחלל, העברת המטען עם אנשי הצוות וניצול משאבים עצמי מן כוכב (In Situ Resources Utilization) [להלן - "ISRU"]; ארכיטקטורה של המידע; ועוד.

**סיכום**

ארכיטקטורה של ניהול שרשרת אספקה ולוגיסטיקה בין-כוכבית היא מורכבת ביותר ומציבה אתגר אמיתי למיטב המוחות האקדמיים, הפועלים לעיצוב השרשרות הלוגיסטיות עבור NASA. אתם, הקוראים, תתקשו בוודאי לעקוב אחר המושגים הרבים, שהוזכרו לעיל. עם זאת, כדאי שתצינו לעצמכם את המאפיינים הייחודיים של ניהול שרשרת אספקה בחלל.

להלן דוגמאות למאפיינים אלה:



מבט מן המעבורת העוגנת בתחנת החלל

(Earth Orbit) [להלן - "LEO"], או מסלול סביב הירח (Low Lunar Orbit) [להלן - "LLO"]

- נקודות איזון (Lagrange Points Nodes), כגון נקודת איזון ראשונה בין כדור ארץ לירח (First Earth-Moon Lagrange Point) [להלן - "EML1"]

ה"כביש המחבר" שתי נקודות בחלל הוא, למעשה, מסלול תנועה קשתי, שמאפשר להעביר מטען ואנשי צוות בטווח מוגדר של זמן. ולדוגמה, תנועת מעבורת חלל מן נקודת LEO לנקודת EML1 עשויה להימשך בין 3-3.7 ימים. ברשת המתפשטת עם הזמן (Time Expanded Network)



מבט מקרוב על המיכל הלוגיסטי הרב-תכליתי (MPLM) בבטן המעבורת

תנועתם של הגופים בחלל (Nodal-motion) משפיעה על אורכם של מסלולי התנועה, על משך הזמן הדרוש להעברת המטען (ואנשי הצוות) בין התחנות, ועל צריכת האנרגיה של מעבורת החלל. מתכננים של שרשרת אספקה בחלל חייבים להתחשב בתנועת הגופים ובהתפשטות הרשת הלוגיסטית בחלל. התפשטות זו יוצרת הבחנה בין הרשת הלוגיסטית בחלל לבין רשת לוגיסטית ארצית, שבה המרחק המפריד בין נקודות פיזיות הוא קבוע.

**3. חקירת מודלים של ביקושים-אספקות בתנאי אי-ודאות**

הדרישות הלוגיסטיות במשימות חלל משתנות על פי: סוג המשימה, מספר אנשי הצוות, משך המשימה, ומאפיינים נוספים. הגדרה של דרישות אלו קובעת את מסת המטען שישוגר למשימת החלל, ואת נפחו.

**ה"כביש המחבר" שתי נקודות בחלל הוא, למעשה, מסלול תנועה קשתי, שמאפשר להעביר מטען ואנשי צוות בטווח מוגדר של זמן. ולדוגמה, תנועת מעבורת חלל מן נקודת LEO לנקודת EML1 עשויה להימשך בין 3-3.7 ימים**

הגדרת הביקושים ותכנון האספקות במודלים השונים מתאפיינים באי-ודאות רבה, הנובעת משינויים מחזוריים בביקושים, משינויים בתמהיל המטען, משינויים בעלויות ההובלה, מהפרעות בלתי-מתוכננות בקווי האספקה, ועוד. כל אלה מחייבים התייחסות לסוגיות של אחסנה ושל מחזור חיי-הציוד (פחת, התיישנות ויציאה מכלל שימוש).

חקירת המודלים של הביקושים הלוגיסטיים היא חיונית, כדי לספק מענה הולם למיגוון משימות חלל עתידיות. לדוגמה, פרוייקט שיגור כלי-רכב צוות מחקר (Crew Exploration Vehicle) [להלן - "CEV"] (מתוכנן לשנים: 2014-2010), גיחות מחקר אל הירח (מתוכננות לשנים: 2018-2020), ופרוייקט הרחבת מוצב התצפית על הירח (מתוכנן לשנים 2021-2023).

חקירת המודלים מקיפה קטיגוריות שונות של אספקות (Classes of Supply)

אספקות מחייב את בחינתו של כל אחד מן המודלים ואת בחינתה של האינטגרציה הכוללת של מודלים אלה.

- השרשרות הלוגיסטיות בחלל דורשות משאבים כלכליים עצומים, ולכן הן מחייבות בחינה כלכלית מקיפה ומעמיקה. פרויקטי מחקר חלל יקומו ויפלו על נושא התקציב. תכנון שרשרות האספקה העתידיות יכלול, בין השאר, בחינה של עקרון ISRU, המאפשר לנצל את המשאבים הקיימים באתר הנחקר, ולחסוך את העלויות הכרוכות בשינועם של משאבים אלה.
- שרשרות אספקה בחלל מבוססות על עקרון הדחיפה (Push). עם זאת, ייתכן שבעתיד יוקמו מחסני ביניים לחלפים בחלל (כגון במסלול הקרוב לכדור הארץ). מחסנים אלה יאפשרו שימוש גם בעקרון המשיכה (Pull).
- עיצוב שרשרות אספקה בחלל צריך להביא בחשבון שינויים במסת המטען ובנפחו, במהלך שינועו בחלל.
- עיצוב שרשרות אספקה בחלל צריך להביא בחשבון את מגבלות הדלק, כי אין אפשרות לתדלק מעבורת חלל במהלך טיסתה, בתחנות דלק שלצדי הדרך. ■



מעבורת החלל מוחזרת לבסיס האם על מטוס בואינג 747 מיוחד

**הכנת תודה**

תודתנו לדוד שמחי-לוי, פרופסור להנדסת מערכות ב-MIT, שסייע לנו בהכנת כתבה זו. מחקריו של פרופ' שמחי-לוי מתמקדים בפיתוחן של טכניקות אפקטיביות ויעילות במערכות לוגיסטיות, וביישומן של טכניקות אלו. פרופ' שמחי-לוי פרסם מאמרים רבים, העוסקים בנושאים של ניהול שרשרת אספקה ושל לוגיסטיקה. הוא המייסד והיושב-ראש של חברת "Logic-Tools" - בית תוכנה, המתמקד בפיתוח של מערכות תומכות החלטה לפתרון בעיות לוגיסטיות ובעיות בניהול שרשרת האספקה. פרופ' שמחי-לוי הוא מחבר משותף (עם Julien Bramel) של הספר: "The Logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistics Management" (Springer, 1997); ומחבר משותף (עם Phil Kaminsky and Edith) של הספר: "Designing and Managing the Supply Chain" (Irwin/McGraw-Hill, 1999); ומחבר משותף (עם Simchi-Levi) של הספר: "Concepts, Strategies, and Case Studies" (Irwin/McGraw-Hill, 2002).

פרטים נוספים על פרויקט "לוגיסטיקה בחלל" (MIT Space Logistics Project), אפשר לקבל באתר: <http://spacelogistics.mit.edu/>

התמונות בכתבה הן באדיבות: NASA Johnson Space Center, Media Resource Center



הליכה בחלל

- שרשרות לוגיסטיות בחלל צריכות לספק את צורכיהם של צוותי מחקר, אשר פועלים באזורים מרוחקים, בתנאי סביבה קשים ובפרקי זמן ממושכים.
- אורכן של שרשרות האספקה משתנה עם תנועתם של הגופים בחלל. עובדה זו משפיעה על משכי המעבר בין שתי נקודות בחלל; ועל צריכת האנרגיה, הדרושה לעבור את הדרך ביניהן.
- עיצוב שרשרות האספקה הופך להיות מורכב יותר ויותר עם השנים, ככל

השרשרות הלוגיסטיות בחלל דורשות משאבים כלכליים עצומים, ולכן הן מחייבות בחינה כלכלית מקיפה ומעמיקה. פרויקטי מחקר חלל יקומו ויפלו על נושא התקציב. תכנון שרשרות האספקה העתידיות יכלול, בין השאר, בחינה של עקרון ISRU, המאפשר לנצל את המשאבים הקיימים באתר הנחקר, ולחסוך את העלויות הכרוכות בשינועם של משאבים אלה

שחקר החלל מתקדם. אם במשימות החלל הראשונות, המטען הועמס כולו על החללית, אזי, במשימות החלל העתידיות - חלק מן המטען ישונע לנקודת היעד בחלל קודם להעברת אנשי הצוות, חלק אחר ישונע עם אנשי הצוות, וחלק נוסף ישונע באמצעות העברות מטען נוספות - מתוכננות ועל פי דרישה.

- שרשרות לוגיסטיות בחלל פועלות בתנאי אי-ודאות רבים של ביקושים. הביקושים בחלל לובשים צורות רבות, כגון: חומרי נפץ ודלקים, כלכלת אנשי הצוות, תחזוקה, פינוי פסולת, ועוד. ניתוח שרשרות ביקושים-



אסטרונוט עובד מחוץ לתחנת החלל