

תשתית אינטרנט מבוססת לוויינים במסלול נמוך (LEO): סקירה טכנולוגית ושאלות מדיניות ציבוריות



סקירה זו נכתבה על ידי ארגון Internet Society ופורסמה בחודש נובמבר 2022:

internetsociety.org/resources/doc/2022/perspectives-on-leo-satellites

תרגום המסמך ועריכתו עבור הקהילה המקצועית בישראל נעשו על ידי איגוד האינטרנט הישראלי (ע"ר)

תקציר מנהלים

אנו נמצאים בעיצומו של מרוץ לחלל שמטרתו היא לחבר את העולם לאינטרנט. חברות כגון OneWeb, SpaceX, אמזון וטלסאט עובדות בקדחתנות על השקת מערכות גדולות (קונסטלציות) של לוויינים במסלול נמוך שיאפשרו גישה לאינטרנט. מערכות אלו יכולות לעזור בגישור הפער הדיגיטלי, במיוחד באזורים כפריים, אבל הן יכולות גם ליצור חששות חדשים בתחומי האבטחה והפרטיות. האם מערכות הלוויינים במסלול נמוך האלה יעזרו לנו לחבר את אלה שאינם מחוברים, ולבנות אינטרנט פתוח, עם גישה גלובלית, בטוחה ומהימנה עבור כולם?

איגוד האינטרנט העולמי (Internet Society) רואה פוטנציאל משמעותי בשימוש בלווייני מסלול נמוך לצרכי גישה לאינטרנט של קהילות ללא גישה או עם גישה לא מספקת, במיוחד במקומות בהם דרכים אחרות לאספקת גישה לאינטרנט אינן מעשיות. אנו רואים פוטנציאל גם במתן גישה לאינטרנט לקהילות שנפגעו על ידי אסון טבע או אסון מעשה אדם, ופוטנציאל להגדלת כושר העמידות של קישוריות לאינטרנט. אולם בסוף 2022, רוב המערכות של לוויינים במסלול נמוך נמצאות בשלבי פריסה מוקדמים, ועדיין קיימות הרבה אי ודאויות.

בזמן שתעשיית הלוויינים במסלול נמוך תפתח בשנים הקרובות, קיימת הזדמנות להנחות את הדיון ולעצב את העתיד של הצורה החדשה הזו של גישה לאינטרנט. מסמך זה מזהה כמה מההזדמנויות והסוגיות שדורשות התייחסות ונועד לעודד שיחות שיובילו להחלטות הגיוניות שיקדמו את הגישה לאינטרנט לכולם, בין אם זו גישה קרקעית, גישה לוויינית, או שילוב שלהן.

מסמך זה מתחיל ברקע כללי על אינטרנט לווייני, ומפרט כמה מונחים ומרכיבים של מערכות אינטרנט לווייני. בהמשך הוא בוחן את ההזדמנויות הרבות עבור אנשים, קהילות, ארגונים וממשלות. אחר כך, אנו מציגים מספר סוגיות שדורשות התייחסות, כגון נשיגות (affordability), הקצאות ספקטרום, פסולת חלל, יכולת פעולה הדדית, אבטחה, פרטיות ושימוש בתקנים פתוחים. בהמשך מוצגות חלק מהשאלות שאין לנו תשובות עבורן, אבל אנו חושבים שצריך לחשוב עליהן, כולל גודל השוק, הקיימות של המודלים העסקיים, וחששות סביבתיים.

לבסוף, אנו מציעים מספר המלצות שנראות לנו נחוצות כדי שמערכות מבוססות לווייני מסלול נמוך יוכלו להגשים את החזון שלנו – הבאת האינטרנט לכולם, בכל מקום.

א. גישה לאינטרנט באמצעות תשתית לוויינית: בסיס טכנולוגי

אינטרנט לווייני קיים כבר שנים רבות באמצעות לוויינים במסלול גבוה (לוויינים גאוסטציונריים – נעים במרחק של כ- 36,000 ק"מ מכדור הארץ. להלן: GEO, Geostationary Orbit או GSO), כגון אלו שמפעילות חברות כגון Eutelsat, Inmarsat, Intelsat, Viasat ורבות אחרות. המערכות האלה מתאימות לצרכי גישה לאינטרנט באזורים שאין בהם קישוריות אחרת. לוויינים מסורתיים אלו הם בדרך כלל בגודל של אוטובוס; הבנייה והשיגור שלהם הם יקרים, אבל אפשר להשיג כיסוי גלובלי עם מספר קטן של לוויינים. גם הצבת האנטנות הקרקעיות היא פשוטה מאוד, מכיוון שלוויינים גאוסטציונריים נעים באותו כיוון עם סיבוב כדור הארץ, ותמיד נראים באותו מיקום בשמיים.

לווייני GEO יש גם חיסרון משמעותי: לוקח זמן רב לאותות לעבור את המרחק של 36,000 ק"מ מכדור הארץ למסלול גיאוסטציונרי ובחזרה. במונחים של רשתות, התקשורת הזו סובלת מרמה גבוהה של "השהיה" (latency). העיכוב הזה הוא בדרך כלל של 600 מילישניות ואינו מתאים להרבה שירותים מודרניים, כולל תקשורת בזמן אמיתי ותקשורת וידאו, גיימינג, ספורט אלקטרוני, שידור ישיר, מסחר פיננסי ומערכות תקשורת חדשות שמתמשות במציאות מדומה ומציאות רבודה (metaverse). קשה לנהל שיחת זום או להיות פעיל בעולם מדומה עם ההשהיה הקיימת במערכות GEO.

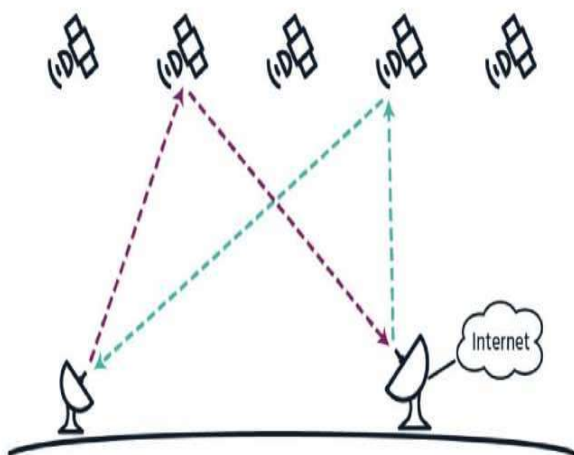
מכיוון שלווייני LEO נעים כל כך מהר, התחנה הקרקעית עשויה לשלוח את התשובה דרך לוויין אחר מזה ששימש לצרכי הבקשה הראשונית. על כן, המסופים הקרקעיים של LEO חייבים לעקוב ולעבוד עם מספר רב של לווייני LEO בתוך מערכת LEO. לעומת זאת, בשנים האחרונות, חברות כגון SpaceX, OneWeb, אמזון וספאט עובדות בקדחתנות על השקת גישה לוויינית לאינטרנט באמצעות מערכות גדולות (קונסטלציות) של לוויינים במסלול נמוך (עד כ-2,000 ק"מ מכדור הארץ, להלן: LEO-Low Earth Orbit), אשר יכולות לספק קשר אינטרנט מהיר עם השהיה נמוכה.¹ במסלולים כל כך קרובים, לוויני LEO נעים במהירות גבוהה מדי בכדי להישאר מעל נקודה אחת, ובדרך כלל רואים אותם מהקרקע לזמן קצר בכל הקפה (בדרך כלל פחות משעתיים). לכן, יש צורך במערכת ("קונסטלציה") של מאות או אלפי לווייני LEO, כמו גם באנטנות קרקעיות שיכולות לעקוב אחר לוויינים כאשר הם חולפים מעליהן. עם זאת, לווייני LEO בדרך כלל צריכים להיות בטווח הפעולה של תחנה קרקעית כדי לשלוח או לקבל נתונים. זה יכול להגביל את הזמינות של מערכת LEO באזור שבו אין תחנה קרקעית זמינה.

¹ Ookla ניתחה את הביצועים של קשרי Starlink ברבעון השני של 2022 ב-22 מדינות והשוותה אותם לביצועים של אינטרנט קרקעי בפס רחב ושל לוויינים גאוסטציונריים: <https://www.ookla.com/articles/starlink-hughesnet-viasat-performance-q2-2022>

ניסיונות קודמים שבוצעו בשנות ה-90 לבנות גישה לאינטרנט עם לווייני מסלול נמוך (על ידי חברות כגון Teledesic) נכשלו במידה רבה. מאז, ההתפתחות של מערכות שיגור מסחריות והתקדמויות אחרות בטכנולוגיית לוויינים הקטינו באופן משמעותי את העלות של פריסת מערכות לוויינים במסלול נמוך.²

כיום, הרבה חברות עתירות משאבים, כמו גם ממשלות שונות, חותרות לספק גישה לאינטרנט באמצעות מערכות של לוויינים במסלול נמוך. כדי להבין את היבטי הטכנולוגיה והמדיניות של מערכת לוויינים במסלול נמוך,

כדאי להבין מהם הרכיבים הנדרשים לצרכי פעולה מוצלחת:



מערכת לוויינים: מאות או אלפי לוויינים שמשוגרים לחלל ובדרך כלל מסודרים ב"קליפות" נפרדות בגבהים שונים.

מסוף משתמש: לפעמים נקרא "מסוף קרקעי" או פשוט אנטנה או צלחת, הוא האופן שבו המשתמשים מקבלים נתונים ומשדרים נתונים ללוויינים. חברות LEO שמוכרות ישירות לצרכנים עשויות גם לשלב ציוד נוסף עם המסוף, כגון נתב Wi-Fi.

תחנות קרקעיות: לפעמים נקראות "שערים" (gateways). אלה הם האנטנות והמתקנים הגדולים שמחברים את הלוויינים לשאר האינטרנט.

לדוגמה, כדי לצפות בדף אינטרנט באמצעות מערכת LEO, דפדפן במחשב ישלח את הבקשה למסוף המשתמש המקומי תוך שימוש בפרוטוקולים סטנדרטיים כגון DNS, HTTPS, TCP ו-IP. מסוף המשתמש יוצר קשר עם לוויין LEO ושולח את הבקשה. הלוויין במסלול נמוך שולח את הבקשה לתחנה קרקעית, שתשלח את הבקשה באינטרנט. כאשר התשובה חוזרת לתחנה הקרקעית, התהליך יחזור על עצמו מהסוף להתחלה – התחנה הקרקעית תשלח את הבקשה ללוויין, והלוויין ישלח נתונים למסוף המשתמש, שישלח את המידע למחשב של המשתמש.

יש לזכור שלוויינים, מסופי משתמש ותחנות קרקעיות יתקשרו ביניהם באמצעות תדרי ספקטרום שיוקצו באמצעות תהליכי רישוי רגולטוריים. לפני שמערכת LEO יכולה לפעול במדינה מסוימת, הרישיונות לתדרי הספקטרום האלה חייבים להיות מאושרים על ידי גורם הרגולציה של אותה מדינה. בנוסף לכך, גם מסופי משתמש ותחנות קרקעיות עשויים להזדקק לרישיונות נוספים לפני שניתן יהיה להשתמש בהם במדינה מסוימת.

² ראו, למשל, תמונה 1 ב- Harry W. Jones, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, 94035-0001, the 48th International Conference on Environmental Systems, https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/74082/ICES_2018_81.pdf

תעשיית הגישה לאינטרנט באמצעות לוויינים במסלול נמוך עדיין בחיתוליה וקיימת רק ספקית אחת של גישה לאינטרנט בקנה מידה רחב באמצעות לוויינים במסלול נמוך – Starlink של SpaceX, שמפעילה יותר מ-3,000 לוויינים בחלל, אבל מתחרים ישירים נמצאים באופק. OneWeb שיגרה למעלה מ-400 לוויינים ומציעה שירותים מסחריים מסוימים. ספקיות אחרות, כגון טלסאט ופרויקט Kuiper של אמזון נמצאות בשלב של ניסויים או ישגרו את מערכות הלוויינים במסלול נמוך שלהן בשנתיים הקרובות. מידע זמין מצביע על כך שעד 2024, אמורות לפעול מספר ספקיות, וחלקן יציעו שירותים באותם מדינות או אזורים גאוגרפיים.

כיום מפותחות טכנולוגיות חדשות שכוללות שימוש בקרני לייזר כדי להחליף נתונים בין לוויינים בחלל. הקשרים האלה, שנקראים קשרים בין-לוויינים (ISLs), קשרי לייזר בין-לוויינים (ISLLs) או קשרים אופטיים בין-לוויינים, יאפשרו לחבילת נתונים לקפוץ מלוויין ללוויין עד שתגיע ללוויין שנמצא בטווח של תחנה קרקעית. זה יאפשר גם למשתמש שנמצא באזור ללא תחנה קרקעית מקומית להתחבר לאינטרנט דרך מערכת LEO. חיבורי "לייזר חלל" אלה עשויים להציע גם את היכולת לספק שירותים בתוך מערכת לוויינים, כגון שירותי מטמון, רשתות הפצת תכנים (CDNs), או מחשוב קצה, ובאופן פוטנציאלי להאיץ את יכולת הגישה למידע עבור משתמשים ולהגדיל את יעילות התקשורת. אולם, היכולות האלה עדיין בשלבי פיתוח או ניסוי.

ב. גישה לאינטרנט באמצעות לוויינים במסלול נמוך: הזדמנויות ויכולות

מערכות גישה לאינטרנט מסוג LEO מציעות יתרונות פוטנציאליים של חיבור אנשים שאינם מחוברים, אספקת אופציות תחרותיות לקישוריות בקהילות שאינן מקבלות שירות טוב, או הוספת עמידות לגישה קיימת לאינטרנט. גישה לאינטרנט באמצעות מערכות LEO עשויה לשפר באופן דרמטי, או אפילו לשנות חיים של אנשים:

- **צרכנים פרטיים:** אנשים באזורים כפריים או מרוחקים דיווחו שהם סופסוף נהנים מקישוריות אמינה ומהירה לאינטרנט. פורומים מקוונים מכילים הרבה עדויות,³ על האופן שבו מערכות LEO שיפרו את הקישוריות של משתמשים פרטיים.
- **תיקון פערים דיגיטליים:** תוכניות פיילוט זיהו שמערכות LEO הן שימושיות לחיבוריות אינטרנט שיתופית.
- **משתמשים בתנועה:** אנשים שנוסעים בקרוואנים מגלים שמערכות LEO מאפשרות להם גישה לאינטרנט

³ אחת מדוגמאות רבות :

https://www.reddit.com/r/Starlink/comments/xkrft1/just_a_reminder_starlink_does_have_good/

בכל מקום שבו הם עוצרים, בין אם זה אתר קרוואנים, מגרש חנייה, או מקום שומם.⁴ הודות לחידושים שמאפשרים שימוש בכלי רכב בתנועה,⁵ קישוריות אפשרית לכל כלי רכב באזור שיש בו כיסוי.

- **מרכזים קהילתיים:** ספריות באזורים כפריים או אזורים של ילידים דיווחו על האופן שבו גישה לאינטרנט LEO שיפרה את הקהילות שלהן, עזרו לתלמידים, ושיפרו את חייהם. גם תוכניות פיילוט בבתי ספר המחישו כיצד גישה משופרת לאינטרנט סייעה מאוד לתלמידים.

- **ספינות וכלי טייס:** אישורים שהתקבלו לאחרונה מאפשרים שימוש במערכות LEO תוך כדי תנועה בספינות וכלי טייס. כיום, הרבה חברות שייט משתמשות במערכות LEO כדי לספק לנוסעיהן חיבור לאינטרנט עם השהיה נמוכה. באופן דומה, הרבה חברות תעופה בוחנות את האפשרות להשתמש במערכות LEO לצורך קישוריות במהלך הטיסה (IFC).

- **התאוששות מאסון:** יכולת פריסה מהירה של גישה ל-LEO זוהתה כ"גיים צ'ינג'ר" על ידי ארגונים שמגיבים לאסונות טבע, כגון רעידות אדמה, סופות הוריקן ושריפות יער.⁶ צוותים הצליחו להגיע לאזור האסון וליצור קשר במהירות גבוהה ועם השהיה נמוכה לעמדות הפיקוד, ועל ידי כך אפשרו תגובה מהירה יותר.

- **זמינות גבוהה ועמידות של הרשת:** הפסקות ארוכות בחיבור לאינטרנט, כגון הניתוק של טונגה עקב קריעת כבל תת-ימי או [הרס תשתית האינטרנט באוקראינה בשנת 2022](#), מדגישות את התפקיד שתקשורת לוויינית יכולה למלא באספקת קיבולת נוספת ועמידות כאשר ניתן לפרוס במהירות מערכות LEO. מערכות LEO יכולות להוסיף קיבולת נוספת או חלופית ולהגביר את העמידות של החיבור לאינטרנט.

מקרי שימוש פוטנציאליים אחרים כוללים גישה לאינטרנט לצורך ניטור מרחוק (חיישנים של רעידות אדמה, שריפות יער, ושיטפונות), מכשירי האינטרנט של הדברים (IoT), מכונות חקלאיות ומרכזים רפואיים במקומות מרוחקים.

⁴ ביולי 2022 ניתן אישור לשימוש ב-SpaceX בקרוואנים : <https://seekingalpha.com/news/3853510-spacexs-starlink-internet-authorized-for-boats-planes-and-rvs>

⁵ באוקטובר 2022, SpaceX הכריזה על אנטנה חדשה, שמאפשרת לכלי רכב שנמצאים בתנועה להתחבר לרשת Starlink : https://www.reddit.com/r/Starlink/comments/xkrft1/just_a_reminder_starlink_does_have_good/

⁶ דוגמה אחת מ-IT Disaster Resource Center : <https://www.linkedin.com/pulse/frequency-daily-pulse-florida-itdrc-hurricaneian-rollinson-/>

ג. מגבלות ואתגרים טכנולוגיים

קיבולת – עם קרוב ל-800,000 משתמשים במערכת אחת (Starlink), מגבלות הקיבולת של מערכות LEO עדיין לא ידועות מספיק. חברת ניתוח הרשת Ookla דיווחה על מהירויות מוקטנות של חיבורי Starlink בשווקים מסוימים ברבעון השני של 2022, בעוד SpaceX הנהיגה רמות שרות חדשות של תנועה מועדפת ותנועה לא מועדפת בצרפת, קנדה וארצות הברית,⁷ שגרמו להופעת תלונות בפורומים מקוונים⁸. אולם זה לא ברור האם מדובר פשוט בקשיי גדילה, בזמן ש-SpaceX ממשיכה לבנות את המערכת המלאה שלה. מחקרי וסימולציות קיבולת בלתי תלויים מתחילים לצוץ,⁹ אבל יש צורך במחקר נוסף.

ככל שהפריסה מתרחבת, חשוב שתהיה גישה לנתונים פתוחים כדי שארגוני מחקר בלתי תלויים יוכלו למדוד את הקיבולת של מערכות LEO במונחים של מספר המשתמשים הנתמכים, משך ההשהיה, תפוקה ואמינות.

יכולת פעולה הדדית – בנושא של תקנים פתוחים שמאפשרים פעולה הדדית, נראה שהתעשייה נמצאת בתהליך של יצירת מספר רב של מערכות לווייני LEO נפרדות שאינן תואמות זו לזו. בהינתן המספר המוגבל של מסלולי לוויינים מתאימים ועלות התפעול הגבוהה, זה יהיה אידאלי אם מערכות LEO יוכלו לפעול כרשת של רשתות גם בחלל וגם על הקרקע.

תקנים פתוחים – באופן אידאלי, הגישה לאינטרנט שאתם מקבלים ממערכת LEO צריכה לספק את אותו סוג של קשר שאתם יכולים לקבל באמצעות מערכת פס רחב קרקעית או חיבור לרשת סלולרית. על הקרקע, היא צריכה להשתמש בתקנים הפתוחים שמתפרסמים על ידי כוח המשימה ההנדסי של האינטרנט (IETF), GPP3, וגופי תקינה אחרים. Starlink – המערכת שאותה היינו מסוגלים לבדוק, תומכת במרבית התקנים העדכניים, אם כי משתמשים מדווחים על זמינות בלתי עקבית של IPv6,¹⁰ פרוטוקול שאותו אנו רואים כבעל חשיבות מכרעת עבור הקיבולת העתידית של האינטרנט. תקני אינטרנט פתוחים מבטיחים יכולת פעולה הדדית ומספקים חווית משתמש משותפת עם שאר האינטרנט העולמי. בחלל, שבו קשה יותר להשתמש בפרוטוקולי ניתוב מקובלים, כגון פרוטוקול BGP, מפעילי מערכות לוויינים מיישמים פרוטוקולי ניתוב והקצאת רוחב פס קנייניים. מספר ארגוני פיתוח תקנים (SDOs)

⁷ ראו <https://techcrunch.com/2022/11/04/starlink-adds-a-1tb-monthly-soft-cap-for-residential-users/> ואת המדיניות הרשמית בכתובת

<https://www.starlink.com/legal/documents/DOC-1134-82708-70>

⁸ ראו את המחקר של Ookla בכתובת <https://www.ookla.com/articles/starlink-hughesnet-viasat-performance-q2-2022>. ראו את ההגבלות על היקף הנתונים ואת מדיניות "שימוש הוגן" של Ookla בכתובת <https://www.pcmag.com/news/spacexs-starlink-quietly-mentions-high-speed-data-caps-are-coming-for-us>. תלונות של משתמשים אפשר לראות ב-r/starlink של Reddit ובמדיות חברתיות שונות.

⁹ דוגמאות: <https://starlink.sx/> ו-<https://mikepuchol.com/modeling-starlink-capacity-843b2387f501>

¹⁰ חיפוש על IPv6 בכתובת <https://www.reddit.com/r/Starlink/> מראה שרשורי הודעות בנושא הזה.

מעורבים באופן פעיל בתקנים שקשורים לאינטרנט בחלל, כולל חטיבת תקשורת הרדיו של ה-ITU (ITU-R), כמו גם הוועדה המייעצת למערכות נתונים בחלל ([CCSDS](#)).

פרטיות – משתמשים במערכת גישה לאינטרנט באמצעות לוויין LEO צריכים לקבל לפחות את אותה רמת תמיכה בתקשורת פרטית שהם מקבלים בחיבורים רגילים לאינטרנט באמצעות פס רחב או רשת סלולרית, כדי למנוע ציתות, פגיעה בתקשורת וניתוב מחדש לא מוסמך של תעבורת אינטרנט. יש לתמוך בטכנולוגיות כגון אבטחת שכבת התעבורה (TLS) בדרך שמאפשרת הצפנה מקצה לקצה. רשתות שפועלות מעל לתקשורת אינטרנט, כגון רשתות פרטיות וירטואליות (VPNs), ממסר פרטי, ושירותי פרטיות דומים צריכים לפעול ללא הפרעה או פגיעה בשירות. רשתות פרטיות וירטואליות צריכות לעבוד. כל המערכות מבוססות לווייני LEO צריכות לספק את התמיכה הזו.

חיבורים בין רשתות (Peering and Interconnection) – מפעילי רשתות בחלל צריכים להתחבר למערכת הקרקעית כדי שתהיה להם גישה לתוכן, שירותי ענן, ויישומי אינטרנט אחרים. אחת הדרכים לקבל גישה לרשתות ולשירותים האלה בעלות נמוכה היא חיבור **למרכזיית אינטרנט (IXP)**. מחלפי אינטרנט מסייעים למפעילי רשתות להתחבר זה לזה ולהחליף מידע באופן מקומי, ולספק תוכן למשתמשי קצה עם השהיה נמוכה. מחלפי אינטרנט בדרך כלל פועלים כנקודות מוקד (Hubs) עבור ספקי תוכן ורשתות אספקת תוכן (CDNs), ומאפשרות למפעילים האלה להחזיק את התוכן שלהם קרוב יותר לתקשורתית למשתמשי הקצה שלהם. משתמשים של שירותים מבוססי לוויין יצאו נשכרים מאוד, גם מבחינת העלות וגם מבחינת הביצועים, אם LEOs ינצלו את הרשת הגלובלית של מחלפי אינטרנט.

אבטחה – מערכות LEO מוסיפות נדבכים חדשים של סיבוך לתשתית המסובכת של האינטרנט. בדומה למערכות GEO מסורתיות, יש בהן תחנות קרקע שמחברות את הלוויינים לאינטרנט, ומסופים קרקעיים שמשמשים לקוחות כדי להתחבר ללוויינים. כפי [שמתואר במסמך שפורסם לאחרונה על ידי הממשל האמריקאי](#), קיימים תחומים רבים בתשתית הלוויינית שדורשים אבטחה. מערכות LEO מביאות את האתגרים הנוספים של כמויות גדולות של לוויינים, ובעתיד רבים מהלוויינים יתקשרו זה עם זה כאשר הם נמצאים במסלול.

ד. אתגרי מדיניות ואסדרה

1.1 תחרות ומודל עסקי

לצד היתרונות הפוטנציאליים הרבים, קיימים היבטים מסוימים של התעשייה המתפתחת של גישה לאינטרנט באמצעות LEO שמחייבים בחינה מדוקדקת.

נשיגות (affordability) וזמינות – השוק עדיין אינו מספיק בשל כדי להבין עד כמה המערכות האלה יכולות להיות נשיגות, במיוחד עבור משתמשים בקהילות שאינן מקבלות שירות או שמקבלות שירות לא מספק.¹¹

במודל העסקי של שירות ישיר לצרכן, ספקים בדרך כלל גובים תשלום ראשוני עבור המסוף הקרקעי, ולאחר מכן תשלום חודשי עבור שירות האינטרנט. כיום, השירות הישיר היחיד לצרכן שזמין בקנה מידה רחב, Starlink, גובה תשלום חד פעמי של 600 דולר ארה"ב עבור המסוף הקרקעי ותשלום חודשי של כ-100 דולר במדינות רבות.¹² לאחרונה התחילו לצוץ תוכניות ממשלתיות שנועדו לעזור לספק למשתמשים גישה למערכות אינטרנט מבוססות LEO.¹³ חלקן מסבסדות את הציוד הראשוני ואת המנוי במשך תקופה מסוימת. אולם, ייתכן שעדיין יהיה צורך בעוד סובסידיות, מענקים, דמי שירות, או תמיכה כספית אחרת כדי לוודא שהגישה היא נשיגה לכל המשתמשים שזקוקים לה. בשלב זה לא ידוע כיצד המחירים ישתנו כאשר מתחרים נוספים ייכנסו לשוק, או כאשר שירותי אינטרנט קרקעיים ייכנסו לתמונה כדי לגשר על הפערים. לא ברור גם אילו מודלים עסקיים אחרים עשויים לצוץ, או מהו היקף הביקוש או נקודות המחיר שמפעילי מערכת LEO יצטרכו כדי להפעיל מודל עסקי בר-קיימא.

תחרות עם מפעילים קיימים – כאשר מערכות LEO מספקות אופציות חדשות של גישה לאינטרנט, אין זה מפתיע שספקים קיימים של אינטרנט לווייני באמצעות GEO, ומפעילי רשתות סיבים אופטיים, פס רחב ואינטרנט אלחוטי קוראים תגר על הגישה של ספקי LEO לספקטרום השידור, רישיונות ומימון ממשלתי, וגם מעלים חששות סביבתיים ואחרים. האם זו פשוט תחרות בפעולה, או האם הספקים הקיימים מנסים ליצור מחסומים לכניסה לשוק ולהרתיע

¹¹ ניתוח שלא יצא לאור שבוצע ב-2022 על ידי האיגוד לאינטרנט נשיגה (A4AI) ו-USAID (הסוכנות האמריקנית לפיתוח בינלאומי) מציג נתונים ראשוניים שממחישים שבאזורים מרוחקים וקשים לגישה מסוימים בקניה, מוסדות שמהווים עוגן לקהילה שלהם חסכו הרבה כסף על ידי שימוש בשירותי גישה לאינטרנט מבוססי LEO בהשוואה לספקי שירות חלופיים. אולם, בשלב זה עדיין אין מספיק נתונים כדי לחזות את הנשיגות בעתיד.

¹² יש לציין ש-SpaceX הגיבה למשבו והתחילה להציע מודלי תמחור אחרים, לרבות תשלום חודשי נמוך יותר וקישוריות על בסיס "שלם כפי יכולתך". במדינות רבות, התשלום הראשוני והתשלום החודשי הם כיום נמוכים במידה משמעותית מהמחיר בדולר ארה"ב.

¹³ למשל, מחוזות חינוך מסוימים בארצות הברית מספקים לתלמידי בתי ספר גישה ל-Starlink: <https://www.nbcnews.com/tech/internet/elon-musks-satellite-internet-flies-radar-public-schools-nationwide-rcna44318>. כדוגמה אחרת, ממשלת קוויבק הקצתה 50 מיליון דולר קנדי כדי לחבר 10,000 בתים ל-Starlink: <https://montrealgazette.com/pmn/news-pmn/canada-news-pmn/remote-quebec-homes-getting-high-speed-internet-access-with-elon-musks-starlink/>.

מתחרים חדשים שמתבססים על טכנולוגיה שונה?

קונסולידציה – תעשיית האינטרנט הלווייני מבוסס LEO אינה חסינה מפני חששות בנושא כוח שוק וקונסולידציה כלכלית שקיימים בכל מגזרי הטכנולוגיה. במקביל לפריסה של מערכות LEO רבות במהלך השנים הקרובות, ייתכן שמפעילים ירכשו מפעילים אחרים ובסופו של דבר שוק הגישה לאינטרנט על בסיס LEO יצטמצם לחברה אחת או שתי חברות. במצב זה, מפעילי ה-LEO יוכלו באופן פוטנציאלי לשלוט בנקודות חנק (choke points).

2.2 תשתיות קריטיות ובטחון לאומי

ככל שהשימוש האזרחי, הממשלתי והצבאי במערכות LEO מתרחב, סביר שיהיו יותר קריאות להכריז על מערכות LEO כעל תשתיות קריטיות, כדי שהן יהיו מכוסות על ידי מדיניות לאומיות ונורמות בינלאומיות רלוונטיות.¹⁴ מערכות LEO מהוות גם מטרה מושכת לפשע מאורגן והתקפות מצד מדינות זרות (למשל, [Viasat ב-2022](#)), במיוחד אם הן משמשות או עשויות לשמש למטרות צבאיות. אפילו מערכות LEO לשימוש אזרחי בלבד עשויות להיחשב כמטרד לנכסים לאומיים בחלל (כגון, [תחנות חלל](#)) או [איום עתידי פוטנציאלי על הביטחון הלאומי](#).

3.2 מסלולים, עצמים ותדרים בחלל החיצון

כיום לא קיים אף גוף שמקצה או מסדיר מסלולים עבור לווייני LEO ולוויינים לא גאוסטציונריים (NGSO) אחרים.¹⁵ מפעילי מערכות LEO מגישים בקשה להקצאת ספקטרום לרגולטור הארצי במדינה או במדינות שבהן הם רוצים לפעול, ומציינים את המסלולים המתוכננים שלהם במסגרת אותה בקשה.¹⁶

מכיוון שמסלולים נמוכים נלקחים למעשה בשיטת "כל הקודם זוכה", אין כל תשלום על שימוש במסלול לווייני. מסלולי לוויינים מיטביים הם משאב סופי, ולכן קיים תמריץ חזק מאוד לחלוצים בתחום להשתלט במהירות על כמה שיותר מסלולים, כדי להשאיר למתחרים שייכנסו לשוק מאוחר יותר פחות אפשרויות מיטביות, אם בכלל. אולם, כדי להימנע מהשתלטות לא מבוקרת על מסלולי לוויינים, רגולטורים מסוימים מגבשים

¹⁴ למשל: <https://www.scientificamerican.com/article/the-biden-administration-must-designate-civilian-satellites-critical-infrastructure>

¹⁵ בכנס 22 Plenipotentiary של איגוד הטלקומוניקציה הבינלאומי של האו"ם (ITU) באוקטובר 2022, המדינות החברות קיבלו החלטה חדשה בנושא "הקיימות של ספקטרום תדרי רדיו ומסלולי לוויינים רלוונטיים שמשמשים ספקי שירות בחלל" שמורה לחטיבת תקשורת הרדיו של ה-ITU (ITU-R) לערוך מחקרים בנושא שימוש בספקטרום התדרים ובמסלולים בחלל על ידי מערכות NGSO, ועודדה את המדינות החברות לפתח את המסגרות הרגולטוריות המתאימות עבור מערכות NGSO. מנהל ה-ITU-R התבקש לדווח על ההתקדמות בנושא זה בכנס תקשורת הרדיו העולמית (WRC) ב-2023.

¹⁶ ראו את הזכות הריבונית של כל מדינה להסדיר את הטלקומוניקציה שלה: עמוד 3, ההנחיה אודות המסגרת הרגולטורית לניהול ספקטרום ארצי, דו"ח (06/2021) ITU-R SM.2093-4 (https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2093-4-2021-PDF-E.pdf), וההכרה הבינלאומית בזכויות האלה על ידי רישום הקצאות התדרים (ולפי הצורך) המסלולים בפועל או המתוכננים בחלל ביומן התדרים הבינלאומי הראשי.

דרישות שמחייבות מפעילי LEO לעמוד בלוחות זמנים מסוימים של פריסת לוויינים כדי לשמור על הקצאות הספקטרום שלהם.

[משרד האו"ם לענייני החלל החיצון](#) (UNOOSA) מנהל יומן של עצמים ששוגרו לחלל החיצון, שהפך לאמצעי לזיהוי מדינות שיש להן אחריות בינלאומית וחבות עבור עצמים בחלל, לרבות פסולת לוויינים. אולם, קיימים חששות מסוימים שהיומן אינו מושלם ושלא קיים תקן מוסכם לגבי אופן הדיווח על עצמים.¹⁷ עם הרבה מערכות פוטנציאליות של אלפי או אפילו עשרות אלפי לוויינים¹⁸ מעבר לשפע העצמים שכבר נמצאים במסלולים נמוכים, קיים פוטנציאל לכמות גדולה של פסולת לוויינים, מתוכננת (דהיינו, סוף מחזור החיים) ובלתי מתוכננת (דהיינו, התנגשויות) כאחד. הפסולת הזו עלולה להזיק באופן פיזי ללוויינים אחרים במסלול נמוך, לגרום להפרעות, או להוות סיכון, בחלל ועל הקרקע. אולם, לפחות בארצות הברית כיום, ועדת התקשורת הפדראלית (FCC) מחייבת מפעילי לווייני LEO [להציא את הלוויינים שלהם ממסלולם תוך 5 שנים מסיום הפעלתם](#).

קיימות הנחיות גם [בהנחיות להתמודדות עם פסולת חלל](#) של ועדת האו"ם לשימוש בחלל החיצון לצרכי שלום (COPUS), [ההנחיות להתמודדות עם פסולת](#) של וועדת התיאום הבין משרדית הבינלאומית בנושא פסולת חלל (IADC), וההצהרה [בנושא מערכות גדולות של לוויינים במסלולים נמוכים](#) של ה-IADC, כמו גם תקן ISO-24114 בנושא מערכות חלל – [דרישות להתמודדות עם פסולת חלל](#). ההנחיות הלא-מחייבות [לקיימות ארוכת-טווח של פעילויות בחלל](#) של ועדת האו"ם לשימוש בחלל החיצון לצרכי שלום (COPUOS) חוזרות על העקרונות בסעיפים 44 ו-45 של [חוקת איגוד הטלוקומוניקציה הבינלאומי \(ITU\)](#) ומדגישות את הצורך לקדם את הקיימות ארוכת הטווח של פעילויות בחלל החיצון, באופן מיוחד, "כדי שלמדינות או קבוצות של מדינות תהיה גישה הוגנת למסלולים ולתדרים האלה, תוך התחשבות בצרכים המיוחדים של מדינות מתפתחות ובמצב הגיאוגרפי של מדינות מסוימות".

בקונגרס הרדיו העולמי ב-2019, חברות ה-ITU הסכימו לחייב מערכות לווייני LEO להציב 10% מהלוויינים שלהן בחלל תוך שנתיים מתחילת הפריסה, 50% תוך חמש שנים ו-100% תוך שבע שנים.¹⁹ ההחלטה הזו נועדה למנוע

¹⁷ ראו, למשל, את המאמרים בכתובת <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468896721000409#!> ובכתובת https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/03/We_re_launching_more_than_ever.

¹⁸ הערכות ראשוניות של גודל המערכת: פרויקט Kuiper: 3,236 לוויינים; Starlink: 4,408 לוויינים (דור ראשון); OneWeb: 647 לוויינים; SatNet: כ-13,000 לוויינים; טלסאט: 188 לוויינים – <https://www.cnbc.com/2022/05/01/amazon-takes-on-spacex-in-the-satellite-internet-with-project-kuiper.html>; <https://spaceflightnow.com/2022/05/13/spacex-passes-2500-satellites-launched-for-companys-starlink-network/>; <https://oneweb.net/resources/oneweb-secures-investment-softbank-and-hughes-network-systems>; <https://spacenews.com/chinese-satellite-propulsion-startup-secures-funding-as-countrys-constellation-projects-grow/>;

<https://www.satellitetoday.com/business/2022/05/06/telesat-downsizes-lightspeed-constellation-plans/>

¹⁹ ITU News, Managing Radio Frequency Spectrum amid a New Space Race (12.11.2021). <https://www.itu.int/hub/2021/11/managing-radio-frequency-spectrum-amid-a-new-space-race/>.

מפרויקטים שאינם מתממשים או נכשלים לתפוס ספקטרומים של תדרים רבי ערך ומוגבלים לתקופות זמן ארוכות, תוך ניצול היתרון של "כל הקודם זוכה". במלים אחרות, "נצלו את זכותכם או שתאבדו אותה".

ה. שאלות פתוחות

בשוק מתפתח מסוג זה יש יותר דברים שאיננו יודעים בהשוואה למה שאנו כן יודעים, כגון:

גודל השוק – יש הרבה גורמים שמניעים את השוק לגישה לאינטרנט מבוססת LEO, כולל התפתחויות חדשות בטכנולוגיות לוויינים ואינטרנט, מזעור, והירידה המהירה בעלויות השיגור, יחד עם מימון או סובסידיות מהממשלה, מסלולי לוויינים פתוחים במידה רבה, וביקוש לאינטרנט באוויר (חברות תעופה) ובים (ענף הספנות).

מהו השוק הכולל הזמין עבור מערכות אינטרנט מבוססות LEO? האם גישה לאינטרנט באמצעות LEO תהיה שימושית רק לאזורים מרוחקים או שאינם מקבלים שירות מספק, עם מעט אופציות נוספות? האם גישה לאינטרנט מבוססת LEO תהיה בת קיימא עבור אזורי הקוטב, בהינתן הכיסוי הנוכחי המוגבל של מסלולי קונסטלציות?

מודלים עסקיים בני קיימא – במרוץ לאספקת גישה לאינטרנט מבוססת LEO, בוצעו השקעות עצומות בהרבה מערכות LEO שונות שנועדו לשמש לקוחות מסוגים שונים. חלקן מתמקדות במנויים ישירים למשתמשים פרטיים. חלקן מתמקדות בחיבור לאינטרנט עבור חברות או ספקי שירותי אינטרנט קרקעיים. אחרות שואפות לספק שירות Wi-Fi לחברות תעופה או לכלי שיט. לפחות מערכת אחת מתמקדת במכשירים חכמים, כלומר, האינטרנט של הדברים (IoT).

האם כל המודלים העסקיים השונים הם בני קיימא? אם הם אינם בני קיימא, האם ממשלות יסבסדו את פעילותם, ובאיזה אמות מידה הן ישתמשו כדי להחליט אילו פעולות לסבסד? האם זה יסיט משאבים מגישה לאינטרנט קרקעי? האם שירות אינטרנט מבוסס LEO לצרכנים בלבד מסוגל להתקיים ללא מענקים ממשלתיים, סובסידיות או השקעה לצרכים בטחוניים? מה יקרה למשתמשים כאשר מערכות LEO מסוימות יפסיקו להיות בנות קיימא מבחינה כלכלית?

מזג האוויר בחלל – בשלב זה לא ברור האם אנחנו מבינים מספיק את האיומים על מערכות LEO שנובעים [ממזג האוויר בחלל](#), כגון סופות שמש, וכיצד הם עלולים להשפיע על גישה לאינטרנט. אולם, בפברואר 2022, [SpaceX](#) [דיווחה על אובדן של למעלה מ-40 לוויינים](#) עקב סופת שמש.

מה יקרה בסופת שמש גדולה פי 10 או פי 100? איך היא תשפיע על הלוויינים במערכות LEO? עד כמה מערכות LEO יהיו עמידות לאיומים כאלה?

גורמים חיצוניים, סובסידיות ועלות השירות האמיתית – ייתכן שיהיה קשה להעריך את העלות האמיתית של אספקת גישה לאינטרנט באמצעות LEO, לא רק בגלל עלויות חיצוניות, סובסידיות, מענקים, הטבות מס, והשקעה לצרכים בטחוניים, אלא גם מכיוון שעלויות התפעול הכוללות עלולות להיות לא ברוורות עקב השילוב עם עסקים אחרים (כגון שיגור לוויינים) וסודיות מסחרית. העלויות החיצוניות של אספקת גישה לאינטרנט מבוססת LEO כוללות פסולת חלל (כגון, הגדלת ההשקעה במניעת התנגשויות, מעקב וניקוי), ועלויות סביבתיות שקשורות בייצור, שיגור, הוצאה משירות, וחזרה לא מבוקרת לכדור הארץ. העלויות האלה נספגות על ידי החברה, וייתכן על ידי מדינות שאינן תומכות או אינן משתמשות בגישה לאינטרנט מבוססת LEO.

האם הן יהיו יעילות מבחינה כלכלית בטווח הארוך כמו טכנולוגיות גישה לאינטרנט אחרות? מהו השימוש הכי יעיל, חסכוני ובר-קיימא בכספי ציבור כדי לתמוך בגישה לאינטרנט בקהילות ללא שירות או עם שירות לא מספק?

עלות סביבתית – מהי ההשפעה הסביבתית של הגישה לאינטרנט באמצעות לווייני LEO?²⁰

למרות שהן לא קשורות באופן ישיר לגישה לאינטרנט, יש שאלות רציניות שצריך לתת עליהן את הדעת כחברה בנושא ההשפעה הסביבתית של מערכות LEO. ייתכן שבקרוב יקיפו את כדור הארץ שלנו הרבה קליפות נפרדות עם עשרות אלפי לוויינים. בנוסף לחשש מפסולת חלל, קיימות שאלות בנושא ההשפעה הסביבתית של ייצור הלוויינים והמספר הגדול מאוד של שיגורי רקטות שיידרשו כדי ליצור את כל הקונסטלציות האלה, וגם ההשפעה על האטמוספירה של כל כך הרבה לוויינים שהוצאו משירות שנשרפים במהלך החזרה לאטמוספירה.

אסטרונמיה – האם גישה לאינטרנט באמצעות לווייני LEO תפגע במחקרים אסטרונומיים? לוויינים היו חלק ממחקרים אסטרונומיים מאז שיגור הלוויין הראשון בסוף שנות ה-50, אבל מערכות גדולות של לווייני LEO יוצרות איומים על פעילויות אסטרונומיה אופטית – במיוחד העקבות שמשאירים לוויינים שמחזירים את אור השמש כאשר הם נמצאים במסלולם. נעשים מאמצים כדי למזער את ההשפעה של לוויינים על תצפיות, גם בהיבטים של בניית לוויינים וגם באמצעות שימוש בעיבוד תמונות כדי להסיר את הנוכחות של לוויינים מתמונות. אולם, עדיין איננו יודעים מה תהיה ההשפעה המלאה על מחקרים אסטרונומיים כאשר כל מערכות ה-LEO המתוכננות ישוגרו בעתיד הקרוב. החשש הוא גדול במיוחד בקרב אסטרונומים שחוקרים אסטרואידים שמסלולם מתקרב לכדור הארץ. יכולתם לגלות אסטרואידים שעלולים לפגוע בכדור הארץ תלויה בתצפיות מאותם סוגים [שייפגעו יותר מכל מקונסטלציות של לוויינים](https://www.pcmag.com/news/large-satellite-systems-may-need-environmental-reviews-gao-says).

²⁰ בנובמבר 2022, משרד מבקר המדינה של ארצות הברית (GAO) פרסם דוח שאומר שעל ה-FCC לבחון מחדש את תהליך האישור הסביבתי שלו עבור מערכות לוויינים גדולות: <https://www.gao.gov/assets/gao-23-105005.pdf>. נראה שה-FCC מסכימה, וזה יכול גם לספק מידע וגם להשפיע על תכניות השיגור ולוחות הזמנים של חברות אמריקאיות. מידע נוסף: <https://www.pcmag.com/news/large-satellite-systems-may-need-environmental-reviews-gao-says>

סיכום והמלצות Internet Society

אנו נמצאים בתקופה מכרעת בחיבור אנשים שעדיין אינם מחוברים לאינטרנט ובהשגת קישוריות אוניברסלית. השילוב של מערכות שיגור פחות יקרות, לוויינים קטנים יותר ובייצור המוני, אנטנות קרקעיות טובות יותר וקטנות יותר, וטכנולוגיה משופרת יצר מצב שבו פריסה בקנה מידה גדול של מערכות לווייני LEO לצרכי גישה לאינטרנט היא אפשרית כיום.

קיים פוטנציאל משמעותי לגשר את הפער הדיגיטלי ולחבר הרבה אנשים נוספים לאינטרנט על ידי שילוב של חיבור אינטרנט קרקעי וחיבור אינטרנט לווייני. אבל, כדי שגישה לאינטרנט באמצעות מערכות LEO תהיה פתרון שימושי לחיבור הבלתי מחוברים, היא צריכה להיות בת-קיימא, נשיגה ואמינה, עבור האנשים שזקוקים לה יותר מכל.

גישה לאינטרנט מבוססת LEO היא טכנולוגיה חדשה שמשתמשת במשאב חדש יחסית (מסלולים נמוכים) שאינו שייך לאף אחד, משותף לכולם, אבל כיום נמצא בהישג ידם של קומץ גורמים. ללא שיתוף פעולה ומחשבה זהירים אודות אופן הפיתוח של צורה חדשה זו של גישה לאינטרנט כדי להרחיב את יכולת ההגעה העולמית של האינטרנט כמשאב להעשרת חייהם של אנשים, קיים סיכון להיקלע [לטרנדיה של נחלת הכלל](#), ואחת התוצאות האפשריות היא פגיעה בלתי הפיכה בסביבה.

נקודת ההתחלה חייבת להיות שללא תלות בשיטת האספקה – כבלים, אלחוט, רשת סלולרית, או לוויין – הרשתות חייבות לאמץ את התכונות הקריטיות של אינטרנט פתוח ואמין:

- **לתמוך בתקני האינטרנט הפתוח העדכניים ביותר, ובפרוטוקולים משותפים בעלי יכולת פעולה הדדית שמאפשרים את האינטרנט הפתוח**
- **ליישם את הנהלים העדכניים הטובים ביותר של הענף בנושאי אבטחה ועמידות של האינטרנט, כגון אלה שמהווים את הבסיס לנורמות המוסכמות לאבטחת ניתוב (MANRS)**
- **לוודא שהמידע שמשודר דרך המערכות שלהן נשמר בפרטיות וסודיות, ואינו משתנה לאורך הדרך (תמיכה בהצפנה מקצה לקצה, עד כמה שניתן)**
- **לקדם את השימוש בתשתיות אינטרנט מקומיות, כגון מחלפי אינטרנט (IXP), כדי לחבר תחנות קרקעיות ולאפשר למשתמשי קצה לגשת לרשתות אחרות בעלות נמוכה ועם השהיה נמוכה (ובחינת אופציות אחרות לתשתית משותפת)**

- ליישם את הנהלים העדכניים ביותר בנושא אבטחה פיזית ואבטחת רשתות והקפדה על כך שהמערכות יהיו מעוצבות בצורה מאובטחת, וינקטו באמצעי הגנה לעומק
- לוודא שניתן לעדכן את תוכנת הלוויינים באופן בטוח מרחוק, ולעודד חוקרי אבטחת תוכנה לחקור ולדווח על נקודות תורפה
- לפעול למען שימוש הוגן בספקטרום התדרים, שיוקצה באופן ברור ויחולק באופן הוגן על פני כל הטכנולוגיות והמפעילים (להימנע מהפרעות בין תדרים)
- להיות שקופים בקשר לקיבולת, להשהיה ולאמינות של שירותים (כולל השוואה לצורות אחרות של גישה לאינטרנט)

חשוב ביותר שחברות חדשות וטכנולוגיות חדשות יוכלו להיכנס ולצאת מהענף באופן הוגן, עם גישה לספקטרום ולמסלולים שיאפשרו להם לפעול באופן אפקטיבי.

במרוץ לחיבור העולם באמצעות החלל, עלינו להגביל את ההשפעה הסביבתית של מערכות מבוססות לווייני LEO, כולל פסולת לוויינים. מכיוון שהרחקת פסולת חלל היא משימה כמעט בלתי אפשרית ברגע שהיא נמצאת בחלל, ספקי מערכות LEO צריכים לנקוט בכל הצעדים האפשריים כדי לצמצם את המספר, הנפח והסוג של הפסולת שהמערכות שלהם יוצרות, לפני או בשלבים הראשונים של הפריסה. בנוסף, זה מקרה ברור שבו נדרש שיתוף פעולה בינלאומי כדי להתמודד עם סוגיות כגון יכולת פעולה הדדית, תכנון מסלולים, הפרעות בין תדרים, פסולת, וסוגיות סביבתיות אחרות.

אם אנחנו רוצים להביא את האינטרנט לכולם, ואם אנו רוצים שאנשים יצטרפו לאינטרנט פתוח, מחובר בכל העולם, בטוח ומהימן, חשוב ביותר שכולנו נתייחס לחששות שפורטו במסמך הזה. עלינו לעקוב אחר ההמלצות האלה ולוודא שמערכות מבוססות לווייני LEO יספקו את חוויית האינטרנט שכולנו צריכים כדי לשגשג.