ניתוח רשת טיסות באירופה באמצעות אלגוריתמים בגרפים

מגישים: שירי וייס, ליאור בן יהודה, אדיר בן דיין

1. מבוא, מוטיבציה והגדרת הבעיה

רשת הטיסות באירופה מחברת בין מאות שדות תעופה, ערים ומדינות. אף שכל שדות התעופה משתייכים לאותה רשת, הם עשויים למלא בה תפקידים מבניים שונים. חלק מהשדות מחוברים ישירות למספר רב של יעדים ומשמשים כמוקדי חיבור מרכזיים, בעוד שדות אחרים מחברים בין אזורים או קבוצות שונות ועשויים להיות חיוניים לשמירה על קישוריות הרשת.

ניתוח ידני של מאות שדות תעופה ואלפי קשרים אינו מאפשר לזהות בקלות את המבנה הכולל של הרשת. אלגוריתמים בגרפים מאפשרים לייצג את מערכת הקשרים כרשת, לחשב את חשיבותם המבנית של שדות שונים, לזהות קהילות ולבחון כיצד הרשת מגיבה להסרת שדות תעופה.

הצורך בשילוב כמה שיטות נובע מכך שמספר רב של קשרים ישירים אינו מעיד בהכרח על חשיבותו של שדה לשמירה על מבנה הרשת. שדה מסוים עשוי להיות מחובר למספר קטן יותר של יעדים, אך לשמש גשר מרכזי בין חלקים שונים של הרשת. לכן בפרויקט מושווים כמה מדדי מרכזיות, נבחנים הקשרים בין מרכזיות לבין אומדן הפעילות, ומבוצעים ניסויי עמידות הבודקים את הפגיעה בקישוריות בעקבות הסרת שדות.

שאלת המחקר המרכזית היא:

כיצד מבנה רשת הטיסות באירופה חושף שדות תעופה מרכזיים, קהילות ונקודות רגישות בקישוריות הרשת?

לצורך מענה על שאלת המחקר הוגדרו המטרות הבאות:

- לזהות שדות תעופה מרכזיים לפי כמה מדדי מרכזיות.
- לבחון האם שדות בעלי קשרים רבים הם גם השדות הקריטיים ביותר למבנה הרשת.
- להשוות בין אומדן הפעילות של שדות התעופה לבין המרכזיות המבנית שלהם.
- לבחון את המבנה המקומי סביב השדות באמצעות מקדם הקיבוץ.
- לזהות קהילות של שדות תעופה ושדות המחברים בין קהילות שונות.
- להשוות בין השפעתה של הסרה אקראית לבין הסרה מכוונת של שדות מרכזיים.

הפרויקט מתמקד בניתוח מבני של הרשת ואינו מנסה לחזות טיסות, עומסים, תדירות טיסות או מספר נוסעים. מטרתו היא להפיק מפת תובנות על מבנה רשת הטיסות באירופה ולזהות מוקדי חיבור, גשרים בין חלקי הרשת ונקודות רגישות אפשריות.

2. עבודה קשורה

מחקרים קודמים הראו כי ניתן לנתח רשתות תעופה באמצעות כלים מתחום הרשתות המורכבות, וכי מדדים שונים מתארים תפקידים שונים של שדות תעופה.

Guimerà ואחרים ניתחו את רשת התחבורה האווירית העולמית ובחנו את המרכזיות ואת המבנה הקהילתי שלה. החוקרים מצאו כי הערים בעלות מספר הקשרים הגדול ביותר אינן בהכרח המרכזיות ביותר לפי Betweenness. הם קישרו פער זה למבנה הקהילתי של הרשת והראו כי תפקידו של צומת תלוי גם בדפוס הקשרים שלו בתוך הקהילה ומחוצה לה. עבודה זו רלוונטית לפרויקט הנוכחי משום שגם כאן מושווים Degree ו־Betweenness, מזוהות קהילות ונבדקים שדות המחברים בין קהילות שונות. [1]

Wang ואחרים חקרו את רשת התחבורה האווירית בסין באמצעות מדדים מבניים כלליים ומדדי Degree, Closeness ו־Betweenness. המחקר הדגים כי כל מדד מייצג היבט שונה של מיקום הצומת ברשת: מספר קשרים ישירים, נגישות לשאר הצמתים ותפקיד כמתווך ביניהם. עבודה זו תומכת בהחלטה בפרויקט שלא להסתמך על מדד מרכזיות אחד, אלא להשוות בין כמה מדדים כדי לקבל תמונה רחבה יותר של חשיבות שדות התעופה. [2]

Lordan ואחרים בחנו את עמידות רשת התחבורה האווירית העולמית באמצעות הדמיה של הסרת שדות תעופה לפי אסטרטגיות שונות. הפגיעה ברשת הוערכה לפי השינוי בגודל הרכיב הקשיר הגדול ביותר, ונבדקה היכולת של מדדי מרכזיות לזהות שדות קריטיים. החוקרים מצאו שאסטרטגיות המבוססות על Betweenness יעילות במיוחד בזיהוי שדות שהסרתם גורמת לאובדן קישוריות משמעותי. עבודה זו קשורה ישירות לניסויי העמידות בפרויקט הנוכחי, שבהם מושוות הסרה אקראית והסרה מכוונת לפי Degree, Betweenness ו־PageRank ברשת. [3]

הפרויקט הנוכחי מיישם רעיונות דומים על רשת הטיסות באירופה המבוססת על נתוני OpenFlights, אך משלב באותו ניתוח כמה נקודות מבט: מרכזיות, אומדן פעילות לפי רשומות route, מקדם קיבוץ מקומי, קהילות, קשרים בין־קהילתיים וניסויי עמידות. השילוב מאפשר להבחין בין שדה בעל פעילות מתועדת גבוהה, שדה שהוא מוקד חיבור רחב ושדה שממלא תפקיד קריטי כגשר מבני.

הערה: הביבליוגרפיה המלאה מצורפת בהערות ההגשה במודל.

3. מודל, אלגוריתמים ושיטת העבודה

3.1 מקור הנתונים והכנתם

הנתונים מבוססים על מאגר OpenFlights. נעשה שימוש בשני קבצים: Airports, המתאר שדות תעופה, ו־Routes, המתאר קשרים בין שדות מוצא ויעד.

בקובץ Airports קיימות 7,698 רשומות, ובקובץ Routes קיימות 67,663 רשומות. רשומת route מייצגת קשר מתועד בין שני שדות, ואינה מייצגת תדירות טיסות, מספר נוסעים או טיסה בזמן אמת.

בשלב הניקוי הוסרו רשומות שבהן מזהה שדה המוצא או היעד היה חסר או לא תקין. לאחר מכן נשארו 67,240 רשומות תקינות.

בהמשך נשמרו רק קשרים שבהם שני השדות נמצאים במדינות שהוגדרו כחלק מאירופה. לאחר הסינון התקבלו 15,224 רשומות route פנימיות באירופה.

מתוך 1,508 שדות אירופיים, 496 הופיעו לפחות בקשר אירופי אחד ונכללו בגרף הפעיל.

קובצי הנתונים של OpenFlights נקראים ישירות מכתובות מקוונות ב־GitHub בעת הרצת מחברת Google Colab. המחברת נשמרת גם במאגר GitHub של הפרויקט, ולכן ניתן להריץ את הקוד ללא הורדה או מיקום ידני של קובצי הנתונים.

3.2 בניית הגרף

הרשת יוצגה כגרף לא־מכוון וממושקל:

- כל שדה תעופה יוצג כצומת.
- קשר route בין שני שדות יוצג כקשת.
- משקל הקשת מייצג את מספר רשומות ה־route שנמצאו בין אותו זוג שדות, ללא תלות בכיוון.

הגרף הוגדר כלא־מכוון משום שהניתוח התמקד בקישוריות הכללית בין שדות התעופה ולא בהבדלים בין כיוון המוצא לכיוון היעד. לכן, אם קיימת רשומה אחת מ־A ל־B ורשומה נוספת מ־B ל־A, נוצרה קשת אחת בין שני השדות שמשקלה 2.

משקל הקשת אינו מייצג את מספר הטיסות בפועל, את מספר הנוסעים או את תדירות הקו. הוא מייצג רק את מספר רשומות ה־route המתועדות במאגר בין אותו זוג שדות.

3.3 מאפיינים מבניים של הרשת

לאחר בניית הגרף חושבו מאפיינים מבניים בסיסיים. הגרף הפעיל כלל:

- 496 צמתים.
- 4,903 קשתות.
- שני רכיבים קשירים.
- 492 צמתים ברכיב הקשיר הגדול ביותר.

כלומר, כ־99.2% מהשדות הפעילים נמצאו ברכיב קשיר מרכזי אחד. לכן ניתוחי המרכזיות, מקדם הקיבוץ, הקהילות וניסויי העמידות בוצעו על רכיב זה.

נבחנה גם התפלגות הדרגות. נמצא כי רוב שדות התעופה מחוברים למספר קטן יחסית של שדות אחרים, בעוד מספר מצומצם של שדות מחובר למספר רב של יעדים. ממצא זה מצביע על מבנה לא אחיד ברשת ומסביר מדוע נדרש שימוש במדדי מרכזיות לזיהוי השדות הבולטים.

3.4 מדדי מרכזיות והשוואתם

כדי לבחון תפקידים מבניים שונים של שדות התעופה, חושבו ארבעה מדדי מרכזיות על הרכיב הקשיר הגדול ביותר:

- **Degree Centrality:** מספר שדות התעופה המחוברים ישירות לשדה.
- **Betweenness Centrality:** מידת הופעת השדה במסלולים קצרים בין זוגות שדות אחרים.
- **Closeness Centrality:** הקרבה המבנית של השדה לשאר שדות הרשת.
- **PageRank:** חשיבות השדה בהתאם גם לחשיבות השדות שאליהם הוא מחובר.

Degree, Betweenness ו־Closeness חושבו על המבנה הלא־ממושקל של הרשת, כך שכל קשר ישיר נחשב צעד אחד. משקל הקשת לא שימש כמרחק, משום שהוא מייצג מספר רשומות route ולא זמן, עלות או מרחק גאוגרפי.

ב־PageRank נעשה שימוש במשקלי הקשתות, כך שקשרים שיוצגו באמצעות מספר רב יותר של רשומות route קיבלו השפעה גבוהה יותר.

עבור כל מדד הופקה רשימת עשרת שדות התעופה בעלי הערכים הגבוהים ביותר. לאחר מכן הושוו ארבע רשימות ה־Top-10, ולכל שדה נספר בכמה רשימות הוא הופיע. השוואה זו אפשרה לזהות שדות הבולטים לפי כמה הגדרות שונות של מרכזיות.

3.5 השוואה בין אומדן פעילות למרכזיות מבנית

מאחר שמאגר OpenFlights אינו כולל תדירות טיסות או מספר נוסעים, הפעילות של כל שדה הוערכה באמצעות הדרגה המשוקללת שלו, כלומר סכום משקלי הקשתות המחוברות אליו. ערך זה מייצג את מספר רשומות ה־route שבהן השדה מופיע כמוצא או כיעד.

Degree רגיל מודד לכמה שדות שונים מחובר השדה, ואילו Degree משוקלל מודד את מספר רשומות ה־route הקשורות אליו. לכן שדה עשוי להיות מחובר למספר מוגבל של יעדים, אך להופיע במספר רב של רשומות לאותם יעדים.

ההשוואה כללה דירוג Top-10 לפי אומדן הפעילות, השוואה לדירוגי המרכזיות וחישוב מתאם Spearman בין הפעילות לבין כל אחד מהמדדים.

העמודה stops לא שימשה לחישוב הפעילות, משום שהיא מתארת את מספר עצירות הביניים ברשומת route ואינה מייצגת תדירות טיסות, מספר נוסעים או את זהות כל שדות הביניים.

3.6 מקדם קיבוץ מקומי

לכל שדה תעופה חושב מקדם הקיבוץ המקומי, המודד איזה חלק מהקשרים האפשריים בין שכניו מתקיים בפועל. המדד שימש לבחינת הלכידות המקומית סביב כל שדה ולהבחנה בין שדות הנמצאים בסביבה צפופה, שבה השכנים מחוברים היטב זה לזה, לבין שדות ששכניהם פחות מחוברים ועשויים למלא תפקיד של חיבור בין חלקים שונים ברשת.

בנוסף חושבו מתאמי Spearman בין מקדם הקיבוץ לבין Degree ובין מקדם הקיבוץ לבין Betweenness.

לצורך ניתוח חקרני הוגדרו גם מועמדים לתפקיד hub-bridge: שדות שנמצאו ברבעון העליון של Degree ושל Betweenness וברבעון התחתון של מקדם הקיבוץ. זוהי הגדרה שנבנתה לצורך הפרויקט ואינה מדד מרכזיות מקובל בפני עצמו.

3.7 זיהוי קהילות וקשרים בין־קהילתיים

לצורך זיהוי קבוצות צפופות של שדות תעופה הופעל אלגוריתם Louvain על הרכיב הקשיר הגדול ביותר.

האלגוריתם מחלק את הרשת לקהילות כך שהקשרים בתוך כל קהילה צפופים יחסית לקשרים בין קהילות שונות. הוא הופעל תוך שימוש במשקלי הקשתות, ואיכות החלוקה נמדדה באמצעות Modularity.

לאחר החלוקה נבדקו מספר הקהילות וגודלן, המדינות והשדות הבולטים בכל קהילה, האפשרות לפרש את הקהילות מבחינה גאוגרפית או מבנית והשדות המקשרים בין קהילות שונות.

עבור כל שדה נספר מספר השדות השכנים המשתייכים לקהילות אחרות. ערך זה מייצג את מספר השכנים החיצוניים השונים, ולא את סכום משקלי הקשתות.

לבסוף הושווה מספר הקשרים הבין־קהילתיים ל־Betweenness Centrality, כדי לבדוק האם שדות בעלי קשרים ישירים רבים לקהילות אחרות הם גם שדות הנמצאים על מספר רב של מסלולים קצרים.

3.8 ניסויי עמידות

כדי לבדוק עד כמה הרשת רגישה להסרת שדות תעופה, בוצעו ניסויי הסרה הדרגתית של צמתים מהרכיב הקשיר הגדול ביותר.

הושוו ארבע אסטרטגיות:

- הסרה אקראית.
- הסרה לפי Degree.
- הסרה לפי Betweenness.
- הסרה לפי PageRank.

בהסרות המכוונות נעשה שימוש בגישה סטטית: מדדי המרכזיות חושבו פעם אחת לפני תחילת הניסוי, והשדות הוסרו לפי הדירוג המקורי שלהם. המדדים לא חושבו מחדש לאחר כל שלב הסרה.

לאחר כל שיעור הסרה נמדדו מספר הצמתים שנותרו, גודל הרכיב הקשיר הגדול ביותר, חלקו מתוך השדות שנותרו, חלקו מתוך הרשת המקורית ומספר הרכיבים הקשירים.

בהסרה האקראית בוצעו 30 חזרות לכל שיעור הסרה, והתוצאות חושבו כממוצע כדי לצמצם את התלות בבחירה אקראית יחידה.

ההשוואה בין האסטרטגיות אפשרה לבדוק האם הסרה של שדות מרכזיים פוגעת בקישוריות יותר מהסרה אקראית, ואיזה מדד מזהה שדות רגישים במיוחד בשלבים שונים של הניסוי.

4. תוצאות וממצאים

4.1 תוצאות מדדי המרכזיות

חישוב מדדי המרכזיות הראה כי שדות שונים בולטים לפי תפקידים מבניים שונים ברשת.

ב־Degree Centrality בלטו AMS, STN, MUC ו־BCN. שדות אלה מחוברים ישירות למספר רב של שדות אחרים ולכן משמשים מוקדי חיבור רחבים.

ב־Betweenness Centrality בלטו ARN, OSL, ATH ו־STN. שדות אלה נמצאים על שיעור גבוה יחסית של מסלולים קצרים ועשויים לשמש גשרים בין חלקים שונים של הרשת.

ב־Closeness Centrality בלטו AMS, BCN, LGW ו־DUB. שדות אלה קרובים מבחינה מבנית לשאר הרשת.

ב־PageRank בלטו BCN, PMI, ARN ו־AMS. שדות אלה מחוברים גם לשדות בעלי חשיבות מבנית גבוהה.

בהשוואת ארבע רשימות ה־Top-10 נמצא כי AMS, BCN, LGW ו־PMI הופיעו בכל ארבע הרשימות, בעוד FRA ו־MUC הופיעו בשלוש מהן. לעומת זאת, ARN, ATH ו־STN בלטו בעיקר במדדים מסוימים.

ממצאים אלה מראים שאין מדד יחיד המתאר באופן מלא את חשיבותו של שדה. שדה יכול לשמש מוקד חיבור ישיר, להיות קרוב לשאר הרשת, להיות מחובר לשדות חשובים או לשמש גשר בין אזורים.

4.2 השוואה בין אומדן הפעילות למרכזיות המבנית

אומדן הפעילות של כל שדה חושב באמצעות הדרגה המשוקללת שלו, כלומר סכום משקלי הקשתות המחוברות אליו. ערך זה מייצג את מספר רשומות ה־route שבהן השדה מופיע כמוצא או כיעד, ואינו מייצג מספר טיסות, תדירות טיסות או מספר נוסעים בפועל.

השדות בעלי אומדן הפעילות הגבוה ביותר היו BCN, PMI, AMS, MUC, FRA, LGW, CDG, VIE, MAN ו־FCO.

בהשוואת רשימות ה־Top-10 נמצאה חפיפה של שבעה שדות בין דירוג הפעילות לבין Degree Centrality, Closeness Centrality ו־PageRank. לעומת זאת, נמצאה חפיפה של ארבעה שדות בלבד עם רשימת Betweenness Centrality.

מתאמי Spearman, שחושבו על כלל השדות ברכיב הקשיר הגדול ביותר, הראו קשר חיובי חזק בין אומדן הפעילות לבין כל מדדי המרכזיות:

- Degree Centrality: 0.986.
- PageRank: 0.943.
- Closeness Centrality: 0.923.
- Betweenness Centrality: 0.894.

המתאם הגבוה במיוחד עם Degree צפוי, משום ששני המדדים קשורים למספר הקשרים של השדה: Degree סופר שדות שכנים שונים, ואילו הדרגה המשוקללת כוללת את כלל רשומות ה־`route` הקשורות אליו.

עם זאת, החפיפה המצומצמת יותר והמתאם הנמוך יותר עם Betweenness מצביעים על תפקיד מבני שונה. שדה עשוי לשמש גשר חשוב בין חלקים שונים של הרשת גם כאשר אומדן הפעילות שלו אינו מהגבוהים ביותר.

לכן, פעילות גבוהה ומרכזיות מבנית קשורות זו לזו, אך אינן מושגים זהים.

4.3 תוצאות מקדם הקיבוץ המקומי

מקדם הקיבוץ המקומי הממוצע ברכיב הקשיר הגדול ביותר היה 0.4509. תוצאה זו מצביעה על רמה בינונית של קישוריות בין שכנים: בחלק מהאזורים שדות המחוברים לאותו שדה מחוברים גם זה לזה, אך המבנה אינו צפוף באופן אחיד בכל הרשת.

מתאם Spearman בין Degree לבין מקדם הקיבוץ היה 0.094 בלבד. כלומר, כמעט שלא נמצא קשר מונוטוני בין מספר הקשרים הישירים של שדה לבין מידת הקישוריות בין שכניו. שדה בעל Degree גבוה אינו בהכרח נמצא בתוך סביבה מקומית צפופה.

המתאם בין Betweenness לבין מקדם הקיבוץ היה שלילי וחלש, בערך 0.121-. תוצאה זו מתאימה לאפשרות ששדות המשמשים גשרים נמצאים לעיתים בסביבה שבה השכנים פחות מחוברים זה לזה. עם זאת, מכיוון שהקשר חלש, אין להסיק שמקדם קיבוץ נמוך מעיד בהכרח על Betweenness גבוה.

לדוגמה, STN הציג Degree של 145 ומקדם קיבוץ נמוך יחסית של 0.133, בעוד BRU הציג Degree של 102 ומקדם קיבוץ גבוה יותר של 0.337. השוואה זו ממחישה כי מספר רב של קשרים אינו מעיד בהכרח על סביבה מקומית צפופה.

בניתוח החקרני של מועמדים לתפקיד hub-bridge בלטו ARN, STN, AMS, PMI ו־LGW. שדות אלה שילבו Degree ו־Betweenness גבוהים עם מקדם קיבוץ נמוך יחסית, ולכן הם עשויים לחבר בין חלקים ששכניהם אינם מחוברים בצפיפות גבוהה זה לזה.

4.4 תוצאות זיהוי הקהילות

אלגוריתם Louvain זיהה שמונה קהילות, בגדלים 123, 79, 78, 71, 64, 61, 9 ו־7 שדות תעופה. ערך ה־Modularity שהתקבל היה 0.2527. ערך זה מצביע על קיום מבנה קהילתי מסוים, אך גם על כך שההפרדה בין הקהילות אינה חזקה מאוד.

חלק מהקהילות הציגו מאפיינים גאוגרפיים ברורים. לדוגמה, נמצאו קהילות שכללו בעיקר שדות מנורווגיה או מהאיים האזוריים.

קהילות אחרות כללו שדות ממספר מדינות. לדוגמה, קהילה אחת כללה שדות רבים מבריטניה ומספרד, ובהם LGW, MAN, PMI, AGP ו־ALC. חלוקה זו עשויה לשקף דפוסי קישור הקשורים לתיירות, אך פרשנות זו מבוססת על מבנה הקשרים בלבד ולא נבדקה באמצעות נתוני נוסעים או מידע על חברות תעופה.

בנוסף נבדקו הקשרים בין קהילות. AMS היה מחובר ישירות ל־131 שדות שונים המשתייכים לשש קהילות אחרות, המספר הגבוה ביותר ברשת. אחריו בלטו MUC, BCN, DUB, STN ו־LGW.

ההשוואה ל־Betweenness Centrality הראתה כי מספר קשרים בין־קהילתיים ו־Betweenness מתארים תפקידים שונים. AMS היה בעל מספר הקשרים הבין־קהילתיים הגבוה ביותר, אך STN קיבל ערך Betweenness גבוה יותר. לכן AMS מתפקד כ־hub רחב עם קשרים חיצוניים רבים, בעוד STN נמצא על שיעור גבוה יותר של מסלולים קצרים בין חלקים שונים של הרשת.

תוצאות אלה מראות כי שדות יכולים לחבר בין קהילות בשתי דרכים: באמצעות קשרים ישירים רבים מחוץ לקהילה, או באמצעות מיקום מרכזי על מסלולים קצרים.

4.5 תוצאות ניסויי העמידות

התוצאות הראו הבדל ברור בין הסרה אקראית לבין הסרה מכוונת של שדות מרכזיים.

לאחר הסרה אקראית של 30% מהשדות, כ־92.4% מהשדות שנותרו עדיין השתייכו לרכיב הקשיר הגדול ביותר. במונחים של הרשת המקורית, רכיב זה כלל כ־64.6% מכלל 492 השדות.

לעומת זאת, לאחר הסרה מכוונת של 20% מהשדות, הרכיב הגדול כלל כ־60.9% מהשדות שנותרו בהסרה לפי Degree, כ־48.5% בהסרה לפי Betweenness וכ־54.3% בהסרה לפי PageRank.

בשלב זה, הסרה לפי Betweenness גרמה לפגיעה החזקה ביותר. ממצא זה תומך בכך ששדות בעלי Betweenness גבוה משמשים גשרים בין חלקים שונים של הרשת, ולכן הסרתם גורמת לפיצול מהיר יחסית.

לאחר הסרה של 30% מהשדות התקבלה הפגיעה החזקה ביותר בהסרה לפי Degree. ביחס לרשת המקורית, הרכיב הגדול כלל כ־5.7% בלבד בהסרה לפי Degree, לעומת כ־12.6% בהסרה לפי Betweenness וכ־7.9% בהסרה לפי PageRank. תוצאה זו מצביעה על כך שהסרה רחבה של hubs בעלי קשרים רבים גורמת לבסוף להתפוררות החמורה ביותר.

גם מספר הרכיבים הקשירים הראה פיצול משמעותי יותר בהסרות המכוונות. לאחר הסרת 30% מהשדות התקבלו 208 רכיבים בהסרה לפי Degree ו־215 רכיבים בהסרה לפי Betweenness ולפי PageRank, לעומת כ־24 רכיבים בממוצע בהסרה האקראית.

לכן, רשת הטיסות שנבדקה עמידה יחסית להסרה אקראית, אך רגישה מאוד להסרה מכוונת של שדות מרכזיים.

5. מסקנה

ניתוח מבנה רשת הטיסות באירופה הראה כי שילוב של כמה שיטות מאפשר לזהות שדות תעופה מרכזיים, קהילות ונקודות רגישות בקישוריות הרשת:

- **מדדי המרכזיות:** מדדים שונים זיהו שדות בולטים שונים, ולכן לא ניתן להגדיר חשיבות באמצעות מדד יחיד בלבד.
- **קשרים רבים לעומת קריטיות:** שדות בעלי קשרים רבים הם לעיתים קרובות מרכזיים, אך אינם בהכרח הקריטיים ביותר למבנה הרשת. שדות בעלי Betweenness גבוה עשויים לשמש גשרים גם כאשר מספר הקשרים שלהם אינו מהגבוהים ביותר.
- **אומדן פעילות לעומת מרכזיות:** נמצא קשר חזק בין אומדן הפעילות למדדי המרכזיות, אך פעילות גבוהה ומרכזיות מבנית אינן מושגים זהים.
- **מבנה מקומי:** מקדם הקיבוץ הראה כי שדה בעל קשרים רבים אינו בהכרח נמצא בסביבה מקומית צפופה, ולכן הוא מוסיף מידע שאינו מתקבל מ־Degree בלבד.
- **קהילות:** אלגוריתם Louvain זיהה שמונה קהילות. שדות יכולים לחבר ביניהן באמצעות קשרים ישירים רבים או באמצעות מיקום מרכזי על מסלולים קצרים.
- **עמידות הרשת:** הרשת נמצאה עמידה יחסית להסרה אקראית, אך רגישה להסרה מכוונת. בשלבים מוקדמים הסרה לפי Betweenness גרמה לפגיעה חזקה במיוחד, ואילו בהסרה רחבה הסרה לפי Degree הובילה להתפוררות חמורה יותר.

לכן, מבנה רשת הטיסות חושף כמה סוגים של חשיבות: מוקדי חיבור רחבים, גשרים בין אזורים ושדות שהסרתם פוגעת בקישוריות. שילוב מדדי המרכזיות, אומדן הפעילות, מקדם הקיבוץ, הקהילות וניסויי העמידות מספק תמונה מלאה יותר של מבנה הרשת ושל נקודות הרגישות שלה.

<u>הערה:</u> קוד הפרויקט בגיטהאב-
https://github.com/Shiri667377/european-flight-network-analysis.git