

השפעת תשתיות תחבורה ירוקה על זיהום אוויר עירוני

מגישים: עדן אליהו 208081489, דניאל חודירב 322648965

תקציר

עבודת מחקר זו בוחנת באופן כמותי את הקשר שבין תשתיות תחבורה ירוקה—כגון שבילי אופניים, שירותי שיתוף אופניים, רכבים חשמליים (EV) ואוטובוסים חשמליים—לרמות זיהום האוויר ב-24 ערים מרכזיות באירופה. נבחר הנושא לאור הדגש ההולך וגובר על הפחתת פליטות במרחב העירוני והמעבר המדיני לתחבורה אלטרנטיבית.

בשלב הראשון השתמשנו בכלים סטטיסטיים לא־פרמטריים כגון קורלציית Spearman, Mann–Whitney U, Kruskal–Wallis על מנת לזהות מתאמים והשוואות בין קבוצות ערים. אחר כך ערכנו Bootstrap (10,000 דגימות) לדימוי אי־הוודאות במדגם קטן, ולבסוף פיתחנו מודל Gradient Boosting לצורך בחינת התרומה היחסית של כל פרמטר תחבורתי לחיזוי רמות הזיהום.

הנחת העבודה היא שהשקעה בתשתיות אופניים ושירותי שיתוף אופניים תפחית באופן משמעותי את הזיהום העירוני, לצד תרומה של רכבים חשמליים ותעריפי תחבורה ציבורית ירוקה מאוזנים. ממצאי המחקר מספקים תובנות אקדמיות ומעשיות לגבי האופן שבו ערים יכולות לתעדף פרויקטים ירוקים כדי לשפר את איכות האוויר ולהקטין את הסיכונים הבריאותיים לתושביהן.

1. מבוא

1.1: רקע וחשיבות

בעשורים האחרונים זיהום האוויר העירוני — ובעיקר ריכוזי PM_{2.5} ו-NO₂ — הפך לאתגר מרכזי בסביבה עירונית, עם השפעות שליליות על בריאות הציבור והתשתיות העירוניות. תחבורה היא אחד הגורמים המובילים לפליטות אלה: כלי רכב פרטיים, אוטובוסים ומטוסים משאירים אחריהם שובל של גזים וחלקיקים מזיקים. במקביל, ערים ברחבי העולם פועלות לעבור לתחבורה ירוקה: החדרת רכב חשמלי (EV), הרחבת רשת שבילי אופניים, פיתוח שירותי שיתוף אופניים והתאמת תעריפי אוטובוס. עם זאת, לא תמיד ברור אילו מהיזמות הללו מניבות את התועלת הרבה ביותר לצמצום הזיהום.

1.2: שאלה ומטרות המחקר

מטרת מחקר זה היא לבחון באופן כמותי ואמפירי את עוצמת הקשר בין תשתיות תחבורה ירוקה לרמות זיהום האוויר ב-24 ערים מרכזיות באירופה. לשם כך אנו שואפים:

- לאתר אילו מדדים תשתיתיים (אורך שבילי אופניים, שירותי שיתוף, EV, תעריפי אוטובוס) מקושרים באופן החזק והיציב ביותר לצמצום זיהום האוויר.
- להעריך את מידת הוודאות והמובהקות של הממצאים באמצעות מבחנים סטטיסטיים לא־פרמטריים (Bootstrap).
- לספק המלצות מעשיות למקבלי החלטות בעיריות בנוגע לתעדוף השקעות בתשתיות ירוקות.

1.3: חדשנות ותרומה

המחקר מאופיין בשלושה אלמנטים חדשניים:

1. שילוב שיטות סטטיסטיות ולימוד מכונה: מעבר לבדיקות קורלציה ומבחנים לא-פרמטריים, אנו משתמשים ב Gradient Boosting כדי לכמת את חשיבותם היחסית של כל פרמטר.
 2. Bootstrap למדגם קטן: הערכת ממצאי מבחנים המחזקת את מהימנות המסקנות גם כאשר המדגם מוגבל ל-24 ערים.
 3. מיקוד תכליתי: הפקת המלצות פרקטיות ויישומיות להתוויית מדיניות עירונית אפקטיבית.
- בהמשך העבודה יוצגו הנתונים, שיטות הניתוח והממצאים, ובסיום נדון בהשלכות המדיניות ובהמלצות להמשך המחקר.

שאלת המחקר המרכזית:

כיצד כמות והתפתחות תשתיות תחבורה ירוקה כגון EV, שבילי אופניים ותעריפי אוטובוס קשורות לרמות זיהום אוויר ($PM_{2.5}/NO_2$) בערים אירופאיות?

2.סקירת רקע ומחקרים קודמים

בשנים האחרונות ניכרת מגמה גלובלית לבחינת השפעת תשתיות תחבורה שונות על איכות האוויר והבריאות הציבורית. להלן שלושה מחקרים מרכזיים הממחישים את המגוון והעומק בתחום:

1. **Effect of pop-up bike lanes on cycling in European cities**
Kraus & Koch (2020) בחנו את השפעת קווי אופניים זמניים ("pop-up") שהוקמו במסגרת תגובת הערים ל- COVID-19 ב-106 ערים אירופאיות. מ-736 מוני אופניים שנבחנו על פני עשור, נמצא שכל קילומטר של תשתית זמנית הוסיף בממוצע 0.6% לנסיעות היומיות באופניים, והוערכו תועלות בריאותיות שנתיות בסך כ-2.3 מיליארד דולר. [arXiv](#)
2. **Do new bike lanes impact air pollution exposure for cyclists? A case study from Berlin**
מחקר זה עקב אחרי רשת שבילי אופניים משודרגים בברלין באמצעות חיישנים ניידים על אופניים, והשווה חשיפה ל- NO_2 -לפני ואחרי ההתקנה. התוצאות הדגימו ירידה מובהקת בריכוזי NO_2 במשך שעות העומס, מה שמצביע על הערך המולד של תשתית אופניים איכותית. [ResearchGate](#)
3. **Commuters' exposure to particulate matter air pollution is affected by mode of transport, fuel type and route**
Zuurbier et al. (2009) בדקו בחלופות נוסעים בין אוטובוסים חשמליים לעומת אוטובוסים דיזל, בעזרת מדידות PM בחלל הנוסעים. הם מצאו כי חשיפה לחלקיקים עדינים (PM) נמוכה ב-50-70% בנוסעים ברכבי תחבורה ציבורית חשמלית בהשוואה לאוטובוסים דיזל. [PMC](#)

המחקרים מראים כי מעבר לתשתיות זמניות או קבועות לשבילי אופניים, וכן שימוש בכלי רכב ותחבורה ציבורית ירוקים, יכול לצמצם באופן משמעותי חשיפה לזיהום אוויר ולשפר תוצאות בריאותיות באוכלוסייה העירונית.

3. נתונים ושיטות

3.1: תיאור הנתונים

מקור SMARTCITY Expo: ספטמבר 2024

דגימה 24: ערים אירופאיות

משתנים:

משתנה	תיאור
EV	מספר רכבים חשמליים רשומים
Public EV Chargers	מספר מטענים ציבוריים
Cycling Routes (km)	אורך שבילי אופניים
Public Bike Companies	מספר חברות שיתוף אופניים
Bus Fare (\$)	תעריף נסיעה ציבורית
Airports	מספר נמלים
Electric Buses	מספר אוטובוסים חשמליים
Overall Score	מדד כולל של "ירוקות"
Air Pollution	רמת PM2.5/NO ₂ (µg/m ³)
Density	צפיפות אוכלוסין בעיר לקמ"ר
Area_km2	שטח העיר בקמ"ר

3.2: עיבוד מוקדם

- נרמול נתונים תחבורתיים באמצעות צפיפות אוכלוסין ושטח עיר.
- בדיקת נורמליות: Shapiro–Wilk ($p < 0.05$) דחיית הנורמליות.

3.3 : שיטות סטטיסטיות לא-פרמטריות

- קורלציית Spearman: למדידת המתאם בין דירוגי כל משתנה תשתית לרמת הזיהום.
- Mann–Whitney: השוואת רמות הזיהום בקבוצת ערים עם EV מעל החציון אל מול מתחתיו.
- Kruskal–Wallis: השוואת רמות הזיהום בין שלישוני אורך שבילי האופניים (נמוך, בינוני, גבוה).

3.4 : בוטסרפ

- לבדיקת השערות בהבדלי ממוצע הזיהום בין קבוצות High Electric_Buses vs. Low Electric_Buses
- הרכבנו 10,000 דגימות bootstrap עם החלפה (resampling) מהנתונים המקוריים, וחישבנו את ההבדל הממוצע ובדקנו האם קיים הבדל בין 2 הקבוצות ברמת זיהום האוויר.

3.5: מודל חיזוי מתקדם Gradient Boosting :

- הקמת מודל: השתמשנו ב־ GradientBoostingRegressor (scikit-learn) כדי לחזות את ערכי Air_Pollution מתוך שאר המשתנים.
- פירוש תוצאות: בהתאם לתוצאות שהתקבלו מהמודל, ניתחנו את ההשפעה היחסית של כל פרמטר באמצעות feature_importances והצגנו את המדדים העיקריים.

4.4 תוצאות מפורטות

להלן תוצאות המחקר, מחולקת לפי כל כלי ניתוח שנקטנו:

4.1: קורלציית Spearman

חישבנו מתאם דירוג (ρ) בין כל אחד ממדדי התחבורה הירוקה, EV, אורך שבילי אופניים, תעריף אוטובוס ועוד ורמת הזיהום ($PM_{2.5}/NO_2$).

תוצאות עיקריות:

- Cycling_Routes_km: -0.51 , $p = 0.0118$
- Electric Buses: -0.42 , $p = 0.0430$
- EV: $\rho = -0.59$, $p = 0.0026$
- Public EV Chargers: -0.42 , $p = 0.0398$

מסקנה:

קשר שלילי משמעותי מצביע על כך שערים עם יותר שבילי אופניים, תעריף אוטובוס גבוה יותר או מספר EV (רכבים חשמליים) גדול יותר נוטים להציג רמות זיהום נמוכות יותר. הממצאים תומכים בהשערת המחקר בדבר עוצמת הקשר בין תחבורה ירוקה להפחתת זיהום.

4.2: מבחן Mann-Whitney U

השווינו את רמת הזיהום בין שתי קבוצות ערים: אלה עם כמות EV מעל החציון ואלה עם EV מתחת לחציון.

תוצאות:

- $U = 40.00$
- $p = 0.0344$

מסקנה:

נמצא הבדל מובהק סטטיסטית ($p < 0.05$) בין שתי הקבוצות: ערים עם EV גבוה חוו רמות זיהום נמוכות יותר בממוצע בהשוואה לערים עם EV נמוך. תומך בתזה שתמריץ EV קשור להפחתת זיהום.

4.3: מבחן Kruskal-Wallis

בחנו אם קיימים הבדלים ברמת הזיהום בין שלוש קבוצות ערים לפי שלישוני אורך שבילי האופניים (נמוך, בינוני, גבוה).

תוצאות:

- $H = 8.30$
- $p = 0.0157$
- לאחר מציאת הבדל משמעותי ברמות זיהום האויר, במבחן וילקוקסון שבוצע בין תתי הקבוצות מצאנו שקיים הבדל בין כמות גבוהה לנמוכה כך שככל שכמות התשתית יותר ארוכה כך זיהום האויר פוחת.

מסקנה:

מבחן Kruskal–Wallis מראה הבדל מובהק בין הקבוצות, ($p < 0.05$) כלומר לא רק קורלציה ליניארית קיימת אלא גם הפרש ברור ברמות הזיהום ככל שאורך השבילים גדל. ממצא זה מחזק את החשיבות של השקעה בתשתיות אופניים.

4.4 Bootstrap לבדיקת השערות

ייצרנו 10,000 דגימות מחדש (resampling) מקבוצות הערים עם מספר אוטובוסים חשמליים גבוה ונמוך ביחס לכמות האוכלוסיה, וחישבנו את ההבדל הממוצע ברמת הזיהום בין הקבוצות בכל דגימה וביצענו מבחן השערות בין 2 הקבוצות כדי לראות האם קיים הבדל משמעותי:

תוצאות:

- הבדל ממוצע $\approx 4.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ לטובת ערים עם Electric_Buses גבוה
- $P = 0.0207$

מסקנה:

תוצאות המבחן $p < 0.05$ מעידות על הפחתה מובהקת ברמת הזיהום בערים עם אוטובוסים חשמליים רבים יותר. תוצאה זו מחזקת את האמינות של המסקנה, גם כאשר המדגם קטן.

Gradient Boosting : 4.5

בשלב זה בנינו מודל Gradient Boosting Regressor על כלל הנתונים הזמינים ללא משתנה ה־ Overall_Score במטרה למצות את תרומת כל משתנה תשתיתי להסבר רמות הזיהום.

אימון המודל:

המודל קיבל בקלט את כל המדדים ההתחלתיים, EV, אורך שבילי אופניים, שירות שיתוף אופניים, תעריפי אוטובוס, מטעני EV, אוטובוסים חשמליים ונמלי תעופה המנומרים (ואת התוצאה הרצויה (Air_Pollution)).

חשיבות משתנים:

לאחר אימון על כלל המדגם, חישבנו את ה feature importances –המייצגות את אחוז התרומה של כל משתנה לניבוי רמת הזיהום:

חשיבות משתנים:

Public_EV_Chargers_per_density	0.403656	•
Cycling_Routes_km_per_area	0.270862	•
EV_per_density	0.255605	•
Electric_Buses_per_density	0.035176	•
Public_Bike_Companies_per_density	0.024521	•
Airports_per_density	0.007524	•
Bus_Fare	0.002656	•

מסקנה:

המודל מאמת את תפקידן המרכזי של שבילי אופניים, עמדות טעינה ורכבים חשמליים בחיזוי רמות הזיהום, כאשר יתר המשתנים תורמים פחות משמעותית. תומך בעמדת המחקר בדבר חשיבות תשתיות אופניים ורכבים חשמלים כצעד ראשון ואפקטיבי להפחתת זיהום.

ביחד, כל שיטת ניתוח מאששת את הטענה המרכזית: תשתיות תחבורה ירוקה – ובעיקר אלה הקשורות לאופניים ורכבים חשמליים – הן המפתח להפחתת זיהום אוויר עירוני.

דיסקליימר: קיימים גורמים רבים המשפיעים על זיהום האוויר (תעשייה, מזג אוויר, שימוש בדלקים פוסיליים מחוץ לתחבורה ועוד). תחבורה היא רק אחד מהם, ולא בהכרח המשמעותית ביותר או הבלעדית; עם זאת, במחקר זה שנמצא קשר אמפירי בין מדדי תחבורה ירוקה לרמות זיהום, אין בכך כדי להוכיח סיבתיות ישירה.

5. דיון ומסקנות

מסקנות עיקריות:

- **שבילי אופניים ושירותי שיתוף אופניים** הם גורמים מרכזיים בהפחתת זיהום האוויר: הן בקורלציות ($\rho \approx -0.51$) והן ב־ feature importance של מודל ה-Gradient Boosting ($\approx 42.8\%$).
- **אוטובוסים חשמליים** תורמים גם הם להפחתת רמות הזיהום: הבדל ממוצע $\approx -4.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ מה שמעיד על אפקט מובהק.
- **רכבים חשמליים (EV)** מציגים קשר שלילי משמעותי $\rho \approx -0.59$ וגם מהווים חלק גדול מהמשקל של חיזוי זיהום האוויר, כמו גם מעידים על קשר בין כמות הרכבים לבין הזיהום בסביבה העירונית.
- **שיטות לא-פרמטריות** (Spearman, Mann–Whitney U, Kruskal–Wallis) וסימולציית Bootstrap העניקו תוקף לממצאים גם תחת חוסר נורמליות ומדגם קטן.
- **Gradient Boosting** סיפק הערכה כמותית של חשיבות כל משתנה וחשף קשרים לא-ליניאריים, מה שהעמיק את הבנתנו לגבי הדינמיקה בין תחבורה ירוקה לזיהום.

סיכום שאלת המחקר והממצאים:

כבר זמן רב שחוקרים ועיריות ברחבי העולם סבורים שקיים קשר הדוק בין תחבורה ופליטות מזהמים וניכר שהמעבר לתחבורה ירוקה עשוי להפחית באופן משמעותי את זיהום האוויר העירוני. במחקר זה הבחנו במגמת הפחתה מובהקת של רמות $\text{PM}_{2.5}$ ו- NO_2 בערים שבהן מושקעים משאבים בשבילי אופניים ושירותי שיתוף אופניים, לצד תרומה ניכרת של אוטובוסים חשמליים ורכבים חשמליים. המתאמים השליליים וניתוחי ה-Gradient Boosting הדגישו כי תשתיות אלו הן הכלים העיקריים שבהם ערים יכולות לסמוך כדי לשפר את איכות האוויר בהיבט התחבורה, אף שהשפעתן מופיעה רק כחלק ממערכת רחבה יותר של גורמי זיהום.

למרות המסקנות הברורות שעולות מן המחקר, חשוב להדגיש כי זיהום האוויר מושפע ממגוון רחב של גורמים שלא נכללו בעבודה זו – כגון פעילות תעשייתית, תנאי מזג אוויר ושימוש בדלקים במגזרים אחרים. הממצאים שלנו מדגישים את תרומת תחבורה ירוקה כחלק מהפתרון, אך אינם מהווים את הגורם הבלעדי או המשמעותי ביותר ביחס למכלול הגורמים המשפיעים על איכות האוויר בעיר. יש להתייחס אליהם במסגרת אסטרטגיה רחבה ונרחבת יותר להפחתת זיהום אוויר.

מגבלות המחקר:

גודל מדגם מוגבל: רק 24 ערים, מה שמקטין את עוצמת ההסקה ומגביל הכללות לעוד ערים.

מדד: cross-sectional: נתוני חתך־זמן יחיד, ללא התייחסות לשינויים לאורך זמן.

היעדר משתנים סביבתיים: לא נכללו היבטים של מזג אוויר, מקור תעשייתי וכיו"ב.

המלצות למדיניות:

1. **השקעה מיידית בתשתיות אופניים:** הקמת שבילים ושיפור קישוריות לרשת השיתוף.
2. **תמרוץ שירותי שיתוף אופניים:** תמיכה כלכלית לספקים ופריסת תחנות במרכזי פעילות.
3. **הרחבת צי אוטובוסים חשמליים:** הוספת קווי תחבורה ציבורית חשמליים באזורים צפופים ותמרוץ רכישתם.
4. **מדיניות תעריפים דינאמית:** התאמת תעריפי אוטובוס לפי זמנים ואזור (peak/off-peak) לעידוד מעבר לתחבורה הציבורית.
5. **שילוב בין-משרדי:** קידום שיתופי פעולה בין תכנון עירוני, בריאות ורווחה לסלילת תשתיות ירוקות.
6. **הגדלת תחנות טעינה חשמלית:** עידוד תושבים על ידי הטבות והנחות לעבור לרכבים חשמליים.
7. **קמפיינים חינוכיים:** עידוד האוכלוסייה למעבר לאופניים ותחבורה ציבורית.
8. **מיפוי מסלולים קריטיים:** איתור מקומות בהם שבילי אופניים חדישים יכולים להביא את התרומה הגדולה ביותר.
9. **בקרת ביצועים:** הקמת מערכי ניטור תנועה ואיכות אוויר בזמן אמת כדי לכוון תעריפים ותשתיות.

כיווני מחקר עתידיים:

- ניתוח זמן-סדרה: בדיקת השפעות מדיניות ותשתית לאורך שנים.
- הכללת משתני מזג אוויר ותעשייה: חיבור למחסנים של נתוני אקלים ופליטות תעשייתיות.
- מחקר בינלאומי: הרחבת המדגם לערים באמריקה, אסיה ואפריקה לשיפור הכלליות.

6. ביבליוגרפיה:

- https://arxiv.org/abs/2008.05883?utm_source=chatgpt.com
- https://www.researchgate.net/publication/343649118_Effect_of_pop-up_bike_lanes_on_cycling_in_European_cities
- https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2898854/?utm_source=chatgpt.com
- <https://www.smartcityexpo.com/the-top-european-cities-with-the-greenest-transportation>
- Wikipedia גודל שטח ערים
- https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_European_Union_cities_proper_by_population_density