

יישום שיטות סטטיסטיות חדישות לתכנון התחבורה

המתכנן (בתחום התחבורה או ב־ תחומים אחרים), אשר נאלץ תכנן פות לבחור בין אלטרנטיבות שונות מבלי שתהיה לו אפשרות לחזות מראש במידה נאותה של בטחון את התוצאות העתידות של כל אחת מאלטרנטיבות אלו. ויתירה מזו, המתכנן נאלץ להיעזר לצורך הכר־עות בהנחות המבוססות על מידה זו או אחרת של שיפוט אישי והכ־רעה "סובייקטיבית".

בזמן האחרון חלו התפתחויות חשובות בתחום זה של תורת הסט־טיסטיקה. כמה וכמה חוקרים (בי־ניהם א. וואלד, ל.י. סבאג, ר. שלאייפר ואחרים) פיתחו שיטות סטטיסטיות חדשות שניתן ליישמן למצבים בהם יש לקבל החלטות בתנאים של חוסר וודאות לגבי ה־התפתחות העתידה. בין שיטות אלו ראויה התורה הסטטיסטית מיסודו של באייס (על שם עקרונות שפותחו לפני למעלה ממאתיים שנה, ב־1763 ע״י הכומר האנגלי Bayes). תורה זו היא נורמטיבית ביסודה, ומרכיביה העיקריים הם הבאים:

א) מתכנן חייב לבחור בין מספר פעולות אלטרנטיביות, אשר תוצ־אותיהן והשלכותיהן אינן ידועות במידה נאותה של בטחון;

ב) המתכנן נושא בהפסדים מסויי־מים כתוצאה מהחלטות מוטעות. המדובר הוא בהפסדים במונחים כספיים או במונחים של תועלת; ג) למתכנן יש אפשרות להשיג מי־

אחת מבין הבעיות החש־רות ביותר לגבי תכנון הערים ושימושי הקרקע, היא הבעיה של מערך התחבורה. כתרומה מעניינת בתחום זה — בעיקר מבחינה מתודולוגית — ניתן לראות את עבודת המחקר*) של ד״ר דן שפר בנושא "החלטות לגבי השקעות בתחבורה בעזרת התורה הסטטיס־טית של באייס", אשר הופיעה לאחרונה מטעם המכון לתחבורה ע״ש ברונר שליד הטכניון בחיפה.

הבעיה המתודולוגית

מחקרו של ד״ר ד. שפר כולל שני חלקים עיקריים. החלק הראשון נ־שא אופי מיתודולוגי, ובו מפתח המחבר את השיטה הסטטיסטית שניתן ליישמה לתכנון המערך ה־תחבורתי.

המחבר מציינ כי השיטות הקל־טיות בתורת הסטטיסטיקה לא הביאו בחשבון מצבים של חוסר בטחון לגבי האפשרויות והתוצאות החזויות. הן גם חתרו למידה מיר־בית של "אובייקטיביות", מבלי להביא בחשבון גורמים של שיפוט אישי, שהינו במידה רבה סובייקטי־בי. אולם שיטות אלו, עם כל חשי־בותן, אינן תואמות את צרכיו של

*) Dr. D. Shefer, Transportation Investment Decisions with Bayesian Statistical decision theory. Brunar Institute of Transportation. The Technion Haifa.

דע רב יותר לגבי ההשלכות האפש-
ריות של פעולותיו. אלא שהשגתו
של מידע נוסף כרוכה בהוצאות
כספיות. השגת המידע תצריך, כמו
כן, זמן ותביא לדחיית ההחלטות;
ויתירה מזו, בדרך הטבע יש לצפות
לכך שמהימנותו של המידע הנוסף
לא תהיה מוחלטת.

ד) השיטות מיסודו של באייס
מאפשרות לקבוע האם ובאיזו מידה
יש צורך במידע הנוסף הזה, ומהי
הדרך שיש להעדיפה לאחר קבלתו
של המידע.

הבחירה בין אלטרנטיבות

בחלק השני של עבודתנו מצביע
המחבר על האפשרויות של יישום
השיטות הסטטיסטיות הנ"ל לב-
עיות של תכנון התחבורה וקבלת
החלטות לגבי השקעות בתחום זה.
לצורך הדגמה מובא במחקר המק-
רה הבא:

נניח כי הרשות לתכנון התחבורה
מבצעת מחקר לגבי הכדאיות של
סלילת כביש חדש בין שני ישובים.
כן נניח כי האלטרנטיבות הבאות
בחשבון הן בעיקרן שלוש: א) סלילת
לת כביש של 4 מסלולים; ב) כביש
של 8 מסלולים; ג) סלילת כביש של
4 מסלולים בשלב ראשון, תוך הח-
טה להרחיבו לשמונה מסלולים
בשלב שני.

על מנת שהמתכנן יוכל לבצע את
הבחירה בין אלטרנטיבות אלו עליו
להגיע מצד אחד לתחזית הביקוש
העתיד לשרותי התחבורה בכביש
הנתון, ואילו מצד שני — עליו לב-
חון את התועלת העשויה לנבוע
לציבור בכל אחת מהאלטרנטיבות
שלעיל.

תחזית הביקוש לשרותי תחבורה

הדרך הפשוטה ביותר לחיזוי הבי-
קוש לשרותי תחבורה בין שתי הע-
רים היא ע"י מודל גרביטציה. מודל
זה מבוסס על ההנחה כי נפח התח-
בורה בין שני אזורים הוא בפרו-
פורציה ישרה למכפלת גודלי האו-
כלוסיה בשני האזורים ובפרופורציה
הפוכה לגורמים הבולמים הנמדדים
ע"י זמן הנסיעה בין האזורים, המר-
חק ביניהם ועוד.

גישה ספציפית ומתוחכמת יותר
מראה כי הביקוש לשרותי תחבורה
בין שני האזורים הוא פונקציה של
הגורמים הבאים: א) מטרת הנ-
סיעות ביניהם? ב) תכיפות הנסי-
עות; ג) טיב אמצעי התחבורה; ד)
אורך הנסיעות (כפי שהוא נמדד ע"י
יחידות מרחק או זמן); ה) התפרו-
סת המרחבית של הפעילויות הסו-
ציו-כלכליות; ו) מחיר הנסיעות;
ז) גורמים כגון רמת השרות, הנו-

חיות, בטחון וכו'.
בנוסף לכל אלה מושפע הביקוש
לשרותי תחבורה באורח בולט ע"י
גובה ההכנסה הפנויה של משקי
הבית; וזאת משני טעמים: ראשית,
הכנסה גבוהה יותר של משקי הבית
מביאה כרגיל בעקבותיה למספר רב
יותר של נסיעות. ושנית, ערכו של
הזמן המשמש לנסיעות גדל במידה
שההכנסה גדולה יותר. ועוד, מחק-
רים רבים הצביעו על מידה גבוהה
של קורלציה בין מספר הנסיעות
לבין הבעלות על מכוניות.

בעיקרו של דבר מותנה אפוא גי-
דול הביקוש לשרותי תחבורה בשני
גורמים: א) גידול האוכלוסיה; ב)
גידול ההכנסה הממוצעת של משקי
בית. ניתן אפוא, להגיע לתחזית נפח

קעות בפרוייקט, באם יוחלט כי הוא יבוצע בשלבים. וגם בבעיה זו יש, כמובן, השפעה לשיפוט האישי של המתכנן.

על יסוד כל אלה מגיע המחבר למסקנה כי לנוכח המידה הרבה של אי-וודאיות שבהן כרוכה הכרעתו של המתכנן בין האלטרנטיבות השוריות, מהראוי ליישם לתכנון התחבורה את השיטות הסטטיסטיות התואמות מצבים של חוסר בטחון ושל צורך בהחלטות על יסוד שיפוט אישי של המתכנן. ובראש וראשונה מהראוי ליישם כאן את השיטות הסטטיסטיות מיסודו של באייס.

יישום על בסיס נתונים קונקרטיים

במחקר נעשה גם נסיון לבחון את האלטרנטיביות שלעיל לגבי כביש בין שתי ערים על יסוד נתונים קונקרטיים. התברר, כי סלילת כביש רחב של שמונה מסלולים יבטיח מכסימציה של התועלת המצופה נטו, אשר תגיע במקרה זה ל-22.6 מיליון דולרים. לעומת זאת, סלילת כביש צר תוך השארתו במצב זה לאורך כל תקופת התכנון, תבטיח תועלת מצופה של 15.4 מיליון דולרים. ואילו אם בהתחלה ייבנה כביש צר, והוא יורחב לאחר מכן בשלב השני, יש לצפות להפסד של 2.2 מיליון דולרים. במלים אחרות, לאלטרנטיבה הראשונה עדיפות ברורה לעומת האלטרנטיבות האחרות.

נניח עתה כי המתכנן דוחה את ההכרעה בין האלטרנטיבות השונות לזמן מסויים עד שיצבור אינפורמציה נוספת. אינפורמציה חדשה זו תסייע להבהרת ההשלכות והאפשרויות השונות הכרוכות בכל אחת

התנועה בין שני אזורים על יסוד הנחות מסויימות לגבי הגידול העתידי של האוכלוסיה ושל רמת ההכנסות הממוצעת, וכן לגבי גורמים אחרים. הנחות אלו מושפעות כמובן מהמידע שבידי התכנון; אך בו בזמן הן מושפעות גם מהשיפוט האישי של המתכנן ויש בהן אלמנט ניכר של חוסר וודאות.

תועלת הציבור

לאלמנט דומה של חוסר וודאות עדים אנו גם בבעיה הבסיסית השניה שבפניה ניצב המתכנן — הבעיה של התועלת הנובעת מהפרוייקט התחבורתי הנתון.

מפעל תחבורתי מסויים מבטיח בעיקרו תועלת בשלושה המובנים הבאים:

(א) תועלת לצרכנים הוותיקים (אשר נסעו גם בעבר בין שני האזורים) ע"י צמצום זמן הנסיעה או ע"י הגדלת הנוחיות והבטחון של הנסיעה;

(ב) תועלת לאותם צרכנים המשיגים — עקב ביצועו של הפרוייקט — את נהגי הנסיעה שלהם (ע"י הגדלת מספר הנסיעות, הגדלת אורך ועוד);

(ג) תועלת לצרכנים חדשים שהשתמשו בעבר בצנורות תחבורה מתחרים, אך עם ביצועו של הפרוייקט החדש החלו להפיק תועלת משירור תינו.

הנסיון מוכיח כי החלטותיו של המתכנן יהיו תלויות במידה רבה בתועלת המצופה מהפרוייקט לטווח ארוך. וכאן, כמובן, מתעוררות בעיות של חוסר וודאות לגבי ההתפתחות בעתיד הרחוק יותר. וכן נודעת כאן חשיבות לעיתוי של ההש-

מהאלטרנטיבות שלעיל. לצורך רי-
כוז המידע הנוסף ניתן, למשל, לב-
חון את המגמות הפוטנציאליות בת-
חום החינוך הגבוה על מנת להגיע
למסקנות מבוססות יותר לגבי הגי-
דול הפוטנציאלי העתיד ברמת ההכ-
נסות. וכן ניתן לבדוק ביתר יסודיות
את המגמות בתחום גודל המשפחות
ומבנה גילים, כדי להשיג שיפור בת-

חזיות לגבי הגידול העתיד של האור-
כלוסיה. המתכנן ניצב כאן בפני די-
למה: השגתו של מידע נוסף זה
כרוכה בהוצאה ניכרת. אך מצד שני,
עשויה אינפורמציה זו לשפר במידה
ניכרת את המידע לגבי ההשלכות
והתוצאות האפשריות הכרוכות לגבי
כל אחת מהאלטרנטיבות, אשר
עליהן חייב המתכנן להחליט.

מיקום תעשיות ושיטות למניעת זיהום אויר

עם גידול הערים והעליה ברמת
הפעילות הכלכלית ורמת הצריכה,
הולכות ומחריפות הבעיות של זי-
הום האויר והסביבה. חריפות במ-
יוחד הן הבעיות המתעוררות עם
הקמתם של מפעלי תעשייה; שהרי
חלק ניכר מהתעשיות מביאות בעק-
בותיהן הפרעות שונות כגון עשן,
ריחות, גזים, מזיקים, זיהומים לסו-
גיהם, רעש וכיו"ב. על רקע זה גדלה
לאחרונה ההתעניינות בשאלה של
הבטחת מיקומם הנאות של מפעלי
התעשייה, על מנת לצמצם ככל ה-
אפשר את הסכנות הכרוכות בפיתוח
התעשייתי לגבי איכות הסביבה.

השפעת התיעוש על איכות הסביבה

לנושא זה של השפעת התיעוש על
איכות הסביבה מוקדש סקר בשם
"דגמים מתמטיים של מיקום מפ-
עלי תעשייה והאסטרטגיה של מניעת
זיהומים"*¹, אשר הופיע לאחרונה מ-

טעם המרכז לבעיות העיר והאזור
של הטכניון בחיפה. מחבריו של ה-
סקר, ד"ר ד. שפר ומר ז'. מ. גולד-
מן, מציינים כי הדרך המקובלת ל-
מניעתן של ההשלכות השליליות של
התיעוש על איכות הסביבה היתה
עד כה הקצאת אזורים נפרדים בעיר
לפעילויות הכלכליות השונות, ובין
השאר — אזור נפרד לתעשייה. ואו-
לם, נוכח הקצב הגובר של הפיתוח
האורבני והתעשייתי, דרך זו אינה
מספקת עוד, ויש צורך לפתח שיטות
חדשות לשם מניעת זיהום הסביבה.
חשיבות מרובה נודעת כאן לעבודו-
תיו של ר.א. מון, אשר פיתח קריט-
ריונים מטרולוגיים, העשויים לסייע
בקביעת מיקומם של מפעלי התע-
שיה. אמנם שיטתו של ר.א. מון הי-
תה פשטנית באופן יחסי, ואילו שי-
טות מתוחכמות יותר — המבוס-
סות על דגם הדיפוזיה של האויר —
פותחו לאחרונה ע"י ה.ו. הרצוג ו-

ד.ב. טורנר.

מודלים לצורך אופטימיזציה

על בסיס שיטות אלו מפתחים
מחברי הסקר מודלים מתמטיים,

¹) Dani Shefer and Jean Michel
Gulman, Mathematical Models of
Industrial plan location and pollution
strategies. Center for Urban and
Regional Studies. The Technion,
Haifa, February 1973