

## סקירת שיטות למדידת קומפקטיות של יישובים

נספח זה מבוסס על סקירה כללית של ספרות בנושא קומפקטיות של יישובים (ציבל ובורק, 2006), אשר במרבית המקורות נחשבת כביטוי הפכי לזחילה. להלן מובאות מספר מצומצם יותר של גישות ושיטות רלוונטיות למדידת הפריסה המרחבית של שטחים בנויים. שיטות אלה שימשו בסיס לאוסף המשתנים שנבחרו לחישוב מדד הקומפקטיות של העיריות והמועצות המקומיות המובא בפרסום הנוכחי.

למרות המספר הרב של שיטות למדידת הקומפקטיות של יישוב עירוני המופיעות בספרות, רק חוקרים בודדים ניסו להגדיר את המושג. ההגדרות הקיימות הן למעשה רשימת מאפייני התפתחות הנמדדים ברצף מ"זחל" ל"קומפקטי". קיימת הסכמה כללית שקומפקטיות היא תופעה רב-ממדית מורכבת, שלא ניתנת לכימות באמצעות מידה אחת בלבד, אלא באמצעות צירוף של כמה מידות, וכל מידה מייצגת מאפיין או ממד אחר של התופעה, שאינו בהכרח תלוי בממדים האחרים.<sup>1</sup> באופן עקרוני, ניתן להבחין בשלושה היבטים עיקריים של התפתחות עירונית, והנוסחאות המובאות בהמשך מחולקות ככל האפשר לפי היבטים אלה:

- **תצורה**, המתייחסת לממדים מרחביים-גאומטריים כמו גודל, צורה או התפשטות.<sup>2</sup>
- **עצמת שימוש המרחב**, המתייחסת לממד הצפיפות.
- **ריכוז, רצף פנימי ונגישות** של שימושי קרקע.

## 1. תצורה

Niemi et al. (1990) מראים שעל מדד הקומפקטיות לכלול לפחות שני מרכיבים נפרדים של תצורה: התפשטות בשטח וצורת הגבולות. רוב מידות התצורה שמוצגות בספרות מבוססות על השוואה לצורת המעגל, משום שהיא נחשבת לצורה הקומפקטית ביותר המספקת שטח מקסימלי בתוך היקף נתון. מידות אלה לא מתאימות לאפיון של התפתחות עירונית משום שמעגל (כמו כל צורה מוגדרת אחרת) אינו צורה סבירה לשטח יישוב במציאות. הן בספרות תיאורטית והן במחקרים יישומיים, מומלץ לבחור מידות שאינן מתבססות על צורות גאומטריות. להלן מובאות מידות מסוג זה. נציין כי למרות שמידות אלה לא מתבססות ישירות על המעגל כצורת הבסיס, הן "מקצות" את הערך הקומפקטי ביותר דווקא לצורת המעגל.

<sup>1</sup> "Sprawl, and its antithesis compact development, are constructs, i.e. theoretical abstractions, such as 'intelligence' in education or 'utility' in economics. As such, they must be represented by operational variables (dimensions) that can be objectively measured. These variables may not completely represent the underlying constructs to which they relate, but they capture the essence of the constructs. The various dimensions of development that distinguish compact development from sprawl (density, land use mix etc.) are also constructs, which can be measured in many ways." (Ewing et al., 2002)

<sup>2</sup> "A figure is compact if it is packed into a relatively small space or if its parts are closely packed together. By way of contrast, a figure is not compact to the degree that it is spread out." (Niemi et al., 1990)

## 1.1 מקדם השתנות של רדיאלים

$$(Siegel, 1996) \quad R = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}}{\bar{r}}$$

כאשר  $r_i (i = 1 \dots n)$  – אורכי קווים רדיאליים ( $n > 15$ ) היוצאים מנקודה מרכזית לגבולות השטח בזוויות שוות,  $\bar{r}$  – הממוצע של האורכים, ואת הנקודה המרכזית ניתן להגדיר כמרכז גאומטרי, כמרכז עירוני ראשי או כנקודת המשיכה המרכזית (Suen, 1998).  
המקדם מקבל ערכים בין 0 (מעגל) ל-1 (שטח ארוך דמוי נחש).

## 1.2 מידות היקף-שטח

$$(McGarigal \& Marks, 1995) \quad S_1 = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}}$$

המקבל ערכים מ-1 (מעגל) עד אין-סוף,

$$(Torrens \text{ and } Alberti, 2000) \quad S_2 = \frac{2 \log L}{\log A}$$

המקבל ערכים בין קרוב ל-1 (קרוב לצורת המעגל) לבין קרוב ל-2 (גבול אי-רגולרי),

כאשר  $L$  – היקף האזור,  $A$  – שטח האזור.

## 2. עצמת השימוש במרחב

ניתן להבדיל בין שתי גישות עיקריות למדידת עצמת השימוש במרחב:

- 1) מדידה של צפיפות כללית של שימושי קרקע, מחושבת ככמות הפעילות על הקרקע ביחס לשטח הקרקע. אין הסכמה בספרות לגבי המשתנה לאמידת הפעילות (יחידות מגורים, אוכלוסייה, תעסוקה וכדומה), וגם לגבי הגדרת המכנה – סך השטח (צפיפות ברוטו) או שטח המיועד למגורים (צפיפות נטו).
- 2) מדידה של התפלגות הצפיפות, מתוארת כשיעור מילוי המרחב ביחס למרחק מנקודה מרכזית בעיר (בדרך כלל, מרכז עירוני ראשי). גישה זאת כוללת שיטות רבות, כגון אומדני צפיפות יחסית, מדד אנטרופיה, שיפוע צפיפות וממד פרקטלי.

נציין כי במהלך המחקר נבדקו כמה מידות של צפיפות אוכלוסייה, שחושבו בצורות שונות, ושנמצאו בלתי מתואמות עם המשתנים האחרים שנכללו במודל הקומפקטיות. תוצאות העיבודים הסטטיסטיים הביאו למסקנה שמשתנים אלה אינם שייכים לעולם התוכן של המשתנים הגאומטריים המתמייחים לפריסה מרחבית של שטחים בנויים. לכן הוחלט שלא להכניס את המידות של צפיפות האוכלוסייה במודל הקומפקטיות הסופי.

כמו כן, נבדקו מידות הצפיפות המחושבות כיחס בין השטח הבנוי או השטח הבנוי למגורים לבין סך השטח של המרקם העירוני. משתנים אלה לא נכללו במודל הסופי עקב תרומתם הקטנה להסבר השונות הכוללת.

## 2.1 צפיפות כללית

$$(Galster et al., 2001) \quad D = H / A$$

כאשר  $H$  – כמות הפעילות על הקרקע (מספר תושבים, מספר בתי מגורים וכו'),  $A$  – השטח שעליו מתבצעת הפעילות (שטח שיפוט, שטח מיועד לפיתוח, שטח בנוי, שטח בנוי למגורים וכו').

## 2.2 צפיפות יחסית

Galster et al. (2001) מציעים למדוד צפיפות יחסית על רשת תאי השטח המיועד לפיתוח באמצעות אחוז תאים בעלי צפיפות גבוהה מאוד – לפחות 2 סטיות תקן מעבר לצפיפות הממוצעת. צפיפות הפעילות בתא השטח נמדדת באמצעות היחס בין מספר יחידות הדיור או מספר התושבים בתא לבין שטח התא המיועד לפיתוח.

Hanson and Freihage (2001) מציעים לחשב אחוז יחידות מגורים (או יחידות שאינן למגורים) שנבנו בצפיפות נמוכה, ואחוז יחידות מגורים (או יחידות שאינן למגורים) שנבנו בצפיפות גבוהה.

Ewing et al. (2002) משתמשים במדדי יחס רבים: אחוז האוכלוסייה שגרה בצפיפות נמוכה, אחוז האוכלוסייה שגרה בצפיפות גבוהה, אחוז האוכלוסייה שגרה בתוך 3 מילים מהמרכז העירוני הראשי, אחוז האוכלוסייה שגרה יותר מ-10 מילים מהמרכז העירוני הראשי ועוד.

## 2.3 מדד אנטרופיה

$$(Lata et al., 2001; Shekhar, 2004; Yeh & Li, 1999, 2001) \quad E = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{D} \ln \left[ \frac{D_i}{D} \right]$$

כאשר  $n$  – מספר האזורים האדמיניסטרטיביים שבהם מחולק היישוב;  $D_i$  ו- $D$  – צפיפות התפתחות הקרקע באזור  $i$  וביישוב כולו בהתאם, נמדדת כיחס בין השטח הבנוי לסך השטח.

מדד האנטרופיה מקבל ערכים בין 0, עבור צורת התפתחות קומפקטית, שבה כל ההתפתחות מרוכזת באזור אחד, לבין 1, עבור זחילה, שבה ההתפתחות מתפזרת בכל המרחב.

## 2.4 שיפוע צפיפות

תחת הנחה של עיר אידיאלית, המתפשטת על פני שטח מעגלי ובעלת מרכז יחיד, ניתן למדוד את שיעור מילוי הקרקע ביחס למרחק מנקודה מרכזית, מבוסס על שני מודלים עיקריים של פונקציית צפיפות (Ewing et al., 2002):

$$\text{פונקציה אקספוננציאלית שלילית: } D_i = D_0 \exp(-\beta d_i) \quad \text{או} \quad \ln D_i = \ln D_0 - \beta d_i$$

$$\text{פונקציית חזקה הפכית: } D_i = D_0 d_i^{-\beta} \quad \text{או} \quad \ln D_i = \ln D_0 - \beta \ln d_i$$

כאשר  $D_i$  – ערך הצפיפות בתא פקידה  $i$  הנמצאת במרחק  $d_i$  מהנקודה המרכזית;  $D_0$  ו- $\beta$  – ערך הצפיפות בנקודה המרכזית ומקדם שיפוע הצפיפות בהתאם, שנאמדים מהצורה הלוגריתמית של הרגרסיה.

ככל ש- $\beta$  גדולה יותר, היישוב נחשב קומפקטי (מרוכז) יותר.

## 2.5 ממד פרקטלי של שטח בנוי

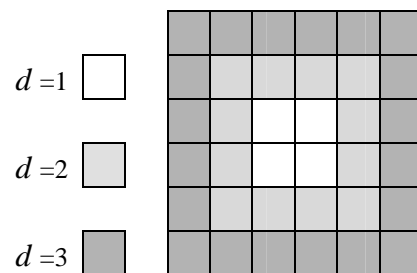
ממד פרקטלי מבטא בו-זמנית הן את מידת מילוי הקרקע והן את שיעור המילוי ככל שמתרחקים מהמרכז. ערך הממד נע בין 1 ל-2. ערך קרוב ל-2 מצביע על פיתוח עירוני מלא ורציף, ואילו ערך קרוב ל-1 מצביע על פיתוח מפוזר ומקוטע.

Mesev et al. (1995) השתמשו בשני אומדנים לממד הפרקטלי של מילוי המרחב, מחושבים על רשת התאים שניצבה מעל נקודת המרכז (ראו תרשים 5):

$$\frac{\ln(P/4)}{\ln \bar{d}} - 1 \quad \frac{\ln D}{\ln \bar{d}} + 2$$

כאשר  $\bar{d} = (\sum_i h_i d_i) / (\sum_i h_i)$  – מרחק ממוצע משוקלל מהמרכז;  $h_i$  – כמות הפעילות (לדוגמה, גודל אוכלוסייה) של תא  $i$  במרחק  $d_i$  יחידות מהמרכז (ראו תרשים 5);  $D$  – צפיפות כללית (סך כל האוכלוסייה מחולק בשטח בנוי);  $P$  – סך כל האוכלוסייה.

### תרשים 5



Torrens and Alberty (2000) הציגו אומדן לממד הפרקטלי של גבול האזור, שמקבל ערכים מקרוב ל-1 (עבור אזור בעל התפתחות עירונית מבוקרת ומרוסנת) עד קרוב ל-2 (עבור אזור בעל התפתחות לא מרוסנת בתוך גבולות אי-רגולריים):

$$\frac{2 \ln L}{\ln S} \quad \text{כאשר } L \text{ – היקף האזור, } S \text{ – שטח האזור.}$$

## 3. ריכוז, רצף פנימי ונגישות

מאפיינים אלה מתייחסים לריכוז ההתפתחות העירונית סביב אזור המרכז, רצף פנימי (רציף כנגד מקוטע, צמוד דופן כנגד דילוגי צפרדע) ונגישות (מרחקים) בין שימושי קרקע או מגרשים שונים. קיימות בספרות מידות רבות מתחומי ידע שונים (מורפולוגיה אורבנית, אקולוגיה נופית, אינטראקציה מרחבית, סוציולוגיה ועוד) שאותן ניתן ליישם במדידת המאפיינים המרחביים של שימושי קרקע. להלן מובאות כמה מידות כאלה, לפי צורת הנוסחאות ותחומי הידע המקוריים.

### 3.1 מידות קרבה הדדית

להלן כמה מידות שבהן נעשה שימוש מעשי במחקרים שונים, במטרה לאמוד את מידת הרצף הפנימי של התפתחות עירונית. עיקר הנוסחאות האלה הוא שקלול בין כמויות הפעילות במגרשים או בתאי שטח לבין המרחקים או מרחקים בריבוע ביניהם.

$$\frac{1}{H} \sum_{i=1}^n h_i d_i : \text{Index of scatter (Torrens \& Alberti, 2000)}$$

כאשר  $n$  – מספר מגרשי מגורים או שכונות ביישוב;  $h_i$  ו-  $H$  – כמות הפעילות (מספר יחידות דיור או תושבים) במגרש  $i$  וביישוב כולו בהתאם;  $d_i$  – מרחק איקלידי בין המרכז של מגרש  $i$  לבין נקודת המשיכה המרכזית של היישוב. קואורדינטות  $(X, Y)$  של נקודת המשיכה המרכזית מחושבות כממוצע משוקלל של קואורדינטות  $(x_i, y_i)$  של מרכזי המגרשים בצורה הבאה:

$$X = \left( \sum_{i=1}^n h_i x_i \right) / H \quad \text{ו-} \quad Y = \left( \sum_{i=1}^n h_i y_i \right) / H \quad (\text{Suen, 1998}).$$

ככל שערך המדד גבוה יותר, ההתפתחות העירונית נחשבת מפוזרת יותר.

$$\frac{1}{\bar{h}} \sum_{i=1}^n h_i d_i^2 : \text{Concentration measure (Gayda et al., 2002-2004)}$$

כאשר  $n$  – מספר מגרשי מגורים או שכונות ביישוב;  $h_i$  ו-  $\bar{h}$  – כמות הפעילות (מספר יחידות דיור או תושבים) במגרש  $i$  וכמות הפעילות הממוצעת בהתאם;  $d_i$  – מרחק איקלידי בין נקודת המשיכה המרכזית של מגרש  $i$  לבין נקודת המשיכה המרכזית של היישוב.

ככל שערך המדד גבוה יותר, ההתפתחות העירונית נחשבת פחות מרוכזת.

$$\frac{1}{0.5n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{z_i z_j}{(100m^2) d_{ij}^2} : \text{Degree of compactness (Think et al., 2001)}$$

המדד מחושב על רשת תאי שטח בגודל  $500m \times 500m$ , כאשר  $z_i$  – שטח בנוי של תא  $i$ ,  $n$  – מספר תאים שבהם  $z_i > 5m^2$ ,  $d_{ij}$  – מרחק איקלידי בין מרכזי התאים  $i$  ו-  $j$ .

המדד מבטא ממוצע של כוח משיכה הדדית בין כל זוג של תאי שטח בעלי שטח בנוי, כאשר כוח המשיכה מחושב באנלוגיה עם חוק הגרביטציה. ככל שערך המדד גבוה יותר, ההתפתחות העירונית נחשבת קומפקטית יותר.

### 3.2 עירוב ונגישות של שימושי קרקע

אחד מהמאפיינים של זחילה עירונית הוא חוסר עירוב של שימושי קרקע, הפרדה מרחבית ואי-נגישות שלהם (לדוגמה, חוסר איזון בין מגורים לתעסוקה). להלן רשימה חלקית של מחקרים ומקורות מידע אשר מציעים כלים לאמידת העירוב והקרבה בין שימושי קרקע שונים.

נציין כי במחקר המובא בפרסום זה הדגש במדידת הקומפקטיות נעשה על ההיבטים שעשויים להשפיע על תפקוד של רשות מקומית, ובמיוחד על אספקת השירותים המוניציפליים לאוכלוסיית הרשות. לכן ההתייחסות היא לפריסה מרחבית של כל השטח הבנוי, ללא הפרדה בין שימושי קרקע שונים. מסיבה זאת לא נכללו במודל הקומפקטיות משתנים, כמו גיוון של שימושי קרקע, איזון בין

מגורים לתעסוקה, נגישות התושבים למרכזי פעילות ולשירותים וכדומה. משתנים אלה קשורים יותר לנושא של תכנון עירוני מבחינת הנוחיות לאוכלוסייה.

McGarigal and Marks (1995) מציעים מידות רבות לעירוב ולגיוון של שימושי קרקע הבאות מתחום אקולוגיה נופית שבה מודדים את רמת ההטרוגניות של אזורים טבעיים.

Galster et al. (2001) מציעים כמה מידות קרבה בין שימושי קרקע שונים, המבוססות על שקלול בין כמויות של שימושי הקרקע לבין המרחקים ביניהם.

Allen (2001) מציג מידות רבות של עירוב ונגישות של שימושי קרקע שונים. מידות אלה מהוות חלק של מערכת ממוחשבת שמספקת כלים לסימולציה ולתכנון של התפתחות עירונית. המשתמש במערכת יכול לבחור את המידות הרלוונטיות לנושא הנחקר. מידות עירוב ונגישות שימושי הקרקע מחושבות על רשת תאים או על פוליגונים שאותם מגדיר המשתמש, ומבוססות על שקלול בין כמויות שימושי הקרקע לבין המרחקים ביניהם.

Song and Knaap (2004) מציעים מידות נגישות של שימושי קרקע אשר מחושבות ברמה של יחידת מגורים. לדוגמה, מרחק ממוצע מיחידות המגורים לנקודות שימושי הקרקע הקרובות (מרכז מסחרי, תחנת אוטובוס, גן ציבורי וכדומה) או אחוז יחידות המגורים הנמצאות במרחק מסוים מכל תחנות האוטובוס או מכל מרכזי הקניות באזור.

פרנקל ואשכנזי (2005) מודדים עירוב שימושי קרקע באמצעות חישוב אחוזים של שימושי קרקע שונים מסך השטח של המרקם העירוני.

### 3.3 דילוגי צפרדע

מסיבות כלכליות, טופוגרפיות, תכנוניות ועוד, התפתחות עירונית יכולה להתבצע בצורה מקוטעת ומפוזרת, בדומה לדילוגי צפרדע, וכמויות גדולות של קרקע פנויה נשארות בין גושים של שטחים בנויים. התפתחות עירונית בצורת דילוגי צפרדע פוגעת ביעילות הספקת השירותים המוניציפליים לתושבי היישוב. להלן כמה אומדנים המוצעים למדידת התופעה.

$$\text{שיעור הקרקע המפותח בצפיפות עירונית (Galster et al., 2001)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i$$

מחושב על רשת תאי שטח של חצי מיל רבוע, כאשר  $n$  – מספר תאי השטח המיועד לפיתוח,  $I_i$  – אינדיקטור המקבל ערך 1 אם הקרקע בתא  $i$  מפותח בצפיפות עירונית (מוגדרת כלפחות 10 יחידות דיור או 50 מועסקים), ו-0 אחרת.

מתקבלים ערכים בין 0 (דילוגי צפרדע) ל-1 (פיתוח צמוד-דופן).

$$\text{מידת חד-גרעיניות של שימושי קרקע (Galster et al., 2001)} = \frac{L_{ic}}{L_{ic} + \sum_s L_{is}}$$

כאשר  $L_{ic}$  ו-  $L_{is}$  – מספר יחידות שימושי קרקע  $i$  בגוש מרכזי  $c$  ובגוש משני  $s$  בהתאם.

ערכים גדולים מעידים על התפתחות עירונית מרוכזת בגוש אחד.

$$\text{מידת דילוגי צפרדע} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (\text{Hasse, 2004; Hasse \& Lathrop, 2003})$$

מחושבת ברמה של יחידת שיכון כמרחק ממוצע של יחידות שיכון חדשות מגוש מגורים ותיק, כאשר  $n$  – מספר יחידות שיכון חדשות, ו- $d_i$  – מרחק איקלידי מיחידת שיכון חדשה  $i$  לגבול הגוש הוותיק.

ערכים גדולים מעידים על תופעת דילוגי צפרדע.