

## מי הדמות החשובה ביותר בלשבור את הקרח? מה רשתות יכולות להגיד לנו על העולם

Petter Holme<sup>1\*</sup>, Mason A. Porter<sup>2</sup>, Hiroki Sayama<sup>3</sup>

<sup>1</sup>המכון למחקר חדשני, מכון טוקיו לטכנולוגיה, יוקוהמה, יפן

<sup>2</sup>המחלקה למתמטיקה, אוניברסיטת קליפורניה לוס אנג'לס, לוס אנג'לס, קליפורניה, ארצות הברית

<sup>3</sup>המרכז לדינמיקות קולקטיביות של מערכות מורכבות, אוניברסיטת בינגהמטון, אוניברסיטת מדינת ניו-יורק, בינגהמטון, ניו-יורק, ארצות הברית

### סוקרות צעירות

CHLOE  
גיל: 14



STEFANIA  
גיל: 15



איך אנו קובעים מי הדמויות החשובות בסרט כמו *לשבור את הקרח*? אנו יכולים לצפות בו, כמובן, אולם ישנן דרכים אחרות – באמצעות מתמטיקה ומחשבים – לראות מה חשוב בעולם החברתי של סיפור. הרעיון הוא לחשב מספרים המְכַנְּים מרכזיות (centrality), שמאפשרים למדוד מי האנשים החשובים ברשתות חברתיות. במאמר הזה נדבר על סוגים שונים של מדידת מרכזיות בדרכים שונות. נדון גם באופן שבו אנשים משתמשים במרכזיות כדי לחקור סוגים שונים של רשתות, לא רק רשתות חברתיות. מדענים מפתחים כיום מדידות מרכזיות שמביאות בחשבון גם שינויים לאורך זמן וסוגים שונים של קשרים.

### הסרט *לשבור את הקרח* ורשתות חברתיות

האם ראיתם את הסרט *לשבור את הקרח*? הוא מספר את סיפורן של שתי אחיות יתומות, אלזה ואנה, שהן נסיכות בממלכת ארנדל. לאלזה יש כוח קסם שמאפשר לה ליצור שלג וקרח, אולם הקסם הזה מסוכן לאנשים שסביבה. כדי להגן על אנה, אלזה נמנעה ממנה מאז שהן היו

קטנות מאוד. ביום ההולדת העשרים ואחד של אלזה, היא הוכתרה למלכת ארננדל. במסיבה לציון חגיגת ההכתרה שלה, היא מאבדת שליטה על יכולות הקסם שלה ומטילה על ארננדל כישוף שגוזר עליה חורף נצחי. אלזה נהיית מתוסכלת מאוד ועוזבת את ארננדל. אנה יוצאת למסע להשיב את אחותה ולשים קץ לכישוף החורף. לאורך הדרך היא פוגשת דמויות בלתי נשכחות כמו קריסטוף סוחר הקרח, חבריו הטרוולים וכמובן איש השלג אולף. אנה גם הושפעה על-ידי הקסם של אלזה והיא מקוללת לקפוא ולהפוך בהדרגה לקרח, כך שחשוב מאוד עבור אנה וכל ארננדל לשבור את הקללה.

בלשבור את הקרח, דמויות רבות מכירות זו את זו, בין אם לפני שהסיפור התחיל ובין אם הן נפגשות במהלך הסרט. אלזה (כמובן) מכירה את אחותה אנה, שמכירה במהלך הסרט את קריסטוף, שמכיר את הטרוולים. אוסף האנשים שמכירים זה את זה, בשילוב עם הקשרים שבין האנשים האלה, נקרא **רשת** חברתית. רשתות חברתיות הן חשובות. לדוגמה, הן מסייעות להפיץ ידע מאחר שאנשים מספרים זה לזה דברים כשהם מדברים או שולחים הודעות אחד לשני. בלשבור את הקרח, לדוגמה, אנה לומדת דרך רשת חברתית שהכישוף שלה יכול להירפא רק על-ידי מעשה של אהבת אמת. היא לומדת זאת מהטרוולים, שאותם היא פגשה דרך קריסטוף.

## רעיונות בסיסיים של מדידת מרכזיות

רשתות חברתיות יכולות להגיד לנו משהו על האנשים שבתוכן. כשמישהו נמצא במצב קשה הוא יכול להיעזר בחבריו. למי יש הכי הרבה חברים בלשבור את הקרח? קשה לקבוע זאת רק דרך צפייה בסרט, אולם אנו יכולים לחקור סוג אחר של רשת חברתית – הרשת של מי מדבר עם מי. הרשת הזו, שמוצגת באיור 1, אינה זהה לגמרי לרשת של חברויות, אולם קל הרבה יותר לקבוע במדויק מי מדבר עם מי בסרט מאשר להחליט בדיוק מי חבר של מי ועד כמה החברויות האלה חזקות. ברשת השיחות הזו אנה מדברת עם תשעה אנשים, אז אנו נניח שיש לה תשעה חברים. מתמטיקאים אומרים שאנה היא **צומת** ברשת הזו, שיש לה **דרגה** של תשע, ושתשעת החברים האלה הם **השכנים** שלה. באופן דומה, לאלזה יש דרגה של שמונה, מאחר שיש לה שמונה חברים; לקריסטוף יש דרגה של שש. חישוב הדרגה של מישהו היא דרך אחת למדוד את החשיבות שלו, אולם ישנן גם הרבה דרכים אחרות.

התבוננו מקרוב באיור 1. האם אתם יכולים לפענח מי הדמות החשובה ביותר בלשבור את הקרח מהתבוננות ברשת שבתמונה הזו? לאנשים חשובים לעיתים קרובות יש הרבה חברים. יתרה מזו החברים של אנשים חשובים הם גם אנשים חשובים בעצמם. כדי למדוד את זה באמצעות מספר אנו מתחילים עם ההנחה שכל הדמויות (כלומר, הצמתים) חשובות באופן זהה, עם ערך ראשוני של 1. אנו מעדכנים את החשיבות (שנקראת **מרכזיות** בשפה של אנשים החוקרים רשתות) של כולם על-ידי סכימת החשיבויות של דמויות שאליהן הם מחוברים (במילים אחרות, השכנים שלהם). אחרי שעשינו זאת פעם אחת, התוצאה הראשונית זהה לדרגה – כלומר, למספר החברים של כל צומת. אנו מחלקים את המספרים האלה בסכום של החשיבויות של כל הצמתים (זה שומר על המספרים מהגעה לערך גבוה מדי) כדי לקבל קבוצה של חשיבויות חדשות. כשאנו חוזרים על זה שוב ושוב ומחליפים את החשיבות של כל צומת בסכום החשיבויות של השכנים שלו ומחלקים את התוצאה בסכום כל החשיבויות ברשת, החשיבויות בסופו של דבר מפסיקות להשתנות. נסו זאת בעצמכם באמצעות איור

### רשת (Network)

אוסף של צמתים  
והחיבורים שביניהם.

### צומת (Node)

הדברים ברשת שמחוברים  
לדברים אחרים. לדוגמה,  
ברשת החברתית של לשבור  
את הקרח הדמויות בסרט  
הן הצמתים.

### דרגה (Degree)

מספר השכנים של צומת.

### שכנים (Neighbors)

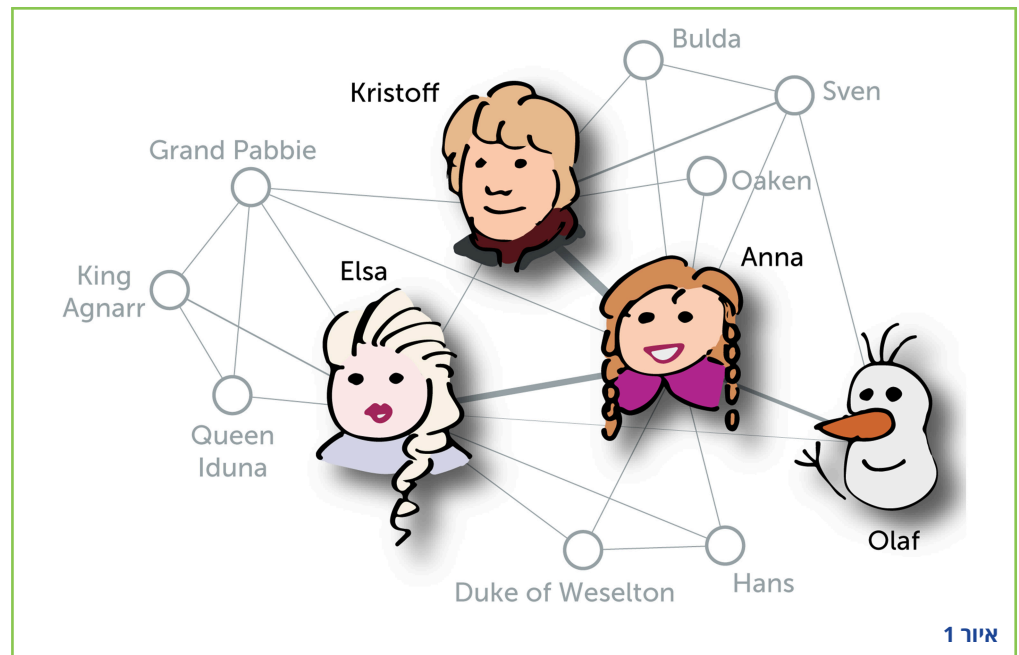
הצמתים שאליהם  
מחובר הצומת.

### מרכזיות (Centrality)

מספר שמבטא כמה צומת  
מסוים חשוב.

## איור 1

רשת של שתי הדמויות הראשיות בלשבור את הקרח. הרשת הזו מראה מי מדבר עם מי בסרט. ככל ששתי דמויות מדברות יותר זו עם זו, כך הקו ביניהן עבה יותר. אנו מדגישים במיוחד את הדמויות החשובות בשחור. כל דמות, כמו אולף, היא "צומת" ברשת. אולף מדבר עם שלוש דמויות – אנה, אלזה וסוון – ברשת הזו, כך שאנו אומרים שיש לו "דרגה" של שלוש. אנה, אלזה וסוון הם ה"שכנים" של אולף ברשת.



איור 1

2; עבור רשתות קטנות, המספרים בדרך כלל מפסיקים להשתנות במהרה. המספרים שאנו מקבלים בסוף החישוב נקראים **מרכזיות וקטור עצמי**, שם "מפוצץ" לסוג מסוים של חשיבות שאנו מחשבים. עבור הרשת באיור 1, אם אנו מביאים בחשבון באיזו תדירות דמויות מדברות זו עם זו, לאנה יש את הערך הכי גדול שעומד על 0.295. לפי המספרים האלה, אנה עדיין הדמות החשובה ביותר אולם כעת קריסטוף ממוקם מעל אלזה. אם אנו מתעלמים מהתדירות שבה דמויות מדברות זו עם זו, המספרים משתנים מעט: אנה עדיין ראשונה, עם 0.146; אלזה שנייה, עם 0.132; וקריסטוף כעת שלישי, עם 0.112.

בשלב הזה אתם עשויים לתהות מדוע אנשים טורחים לחשב מספרים כמו מרכזיות וקטור עצמי כדי למדוד חשיבות. מצפייה בלשבור את הקרח ברור שמרבית הדברים קורים בגלל הקסם של אלזה, אז אולי היא צריכה להיות הדמות החשובה ביותר? אולם, התבוננו שוב ברשת באיור 1: זו רשת של אנשים שמדברים זה עם זה, לא של מי מבצע איזו פעולה שגורמת לאירוע מרכזי בסרט. הרשת באיור 1 מספרת לנו מי חשוב בסיפור לשבור את הקרח, יותר מאשר מי חשוב כגורם לאירועים עצמם בארנדל.

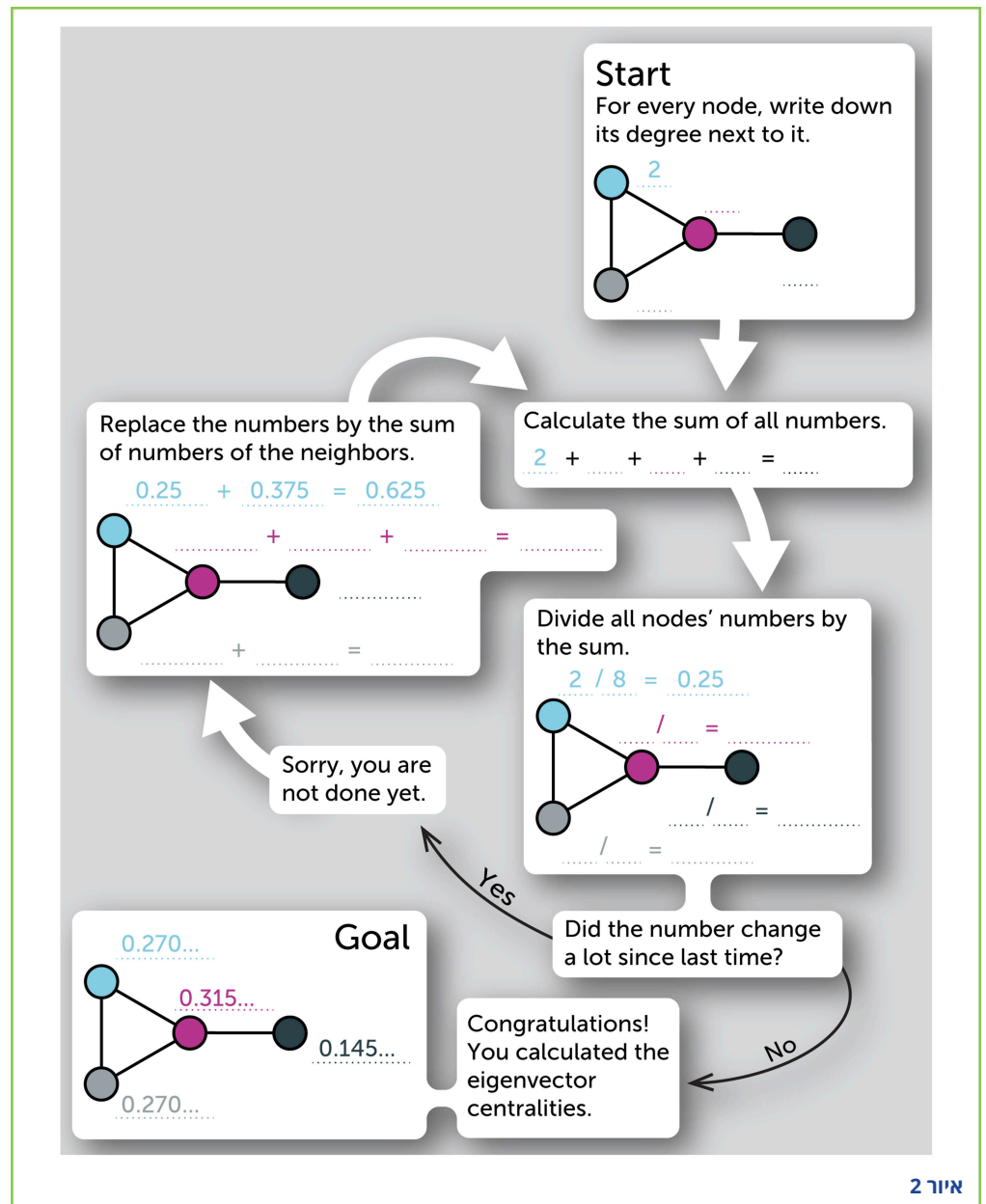
אנו יכולים לערוך חישוב דומה עבור רשת נרטיב, שהיא רשת של אלה אירועים גורמים לאירועים אחרים [1]. במקרה הזה, הרבה יותר קשה לבנות את הרשת. איור 3 הוא ניסיון להתחיל ליצור רשת כזו; אולי אתם תהיו מסוגלים להשלים אותה? ברשת כזו האירועים שנגרמים על-ידי אלזה עשויים להיות בעלי דרגות ומרכזיות וקטור עצמי גבוהות. זה אומר שאף על פי שאנה היא הדמות החשובה יותר עבור הסיפור של לשבור את הקרח, זו אלזה שהכי חשובה עבור האירועים שמרכיבים את הסיפור.

### מרכזיות וקטור עצמי (Eigenvector Centrality)

סוג של מרכזיות שבנוי על הרעיון שלצמתים חשובים יש שכנים חשובים.

**איור 2**

תהליך של צעד אחר צעד לחישוב מרכזיות וקטור עצמי של הצמתים ברשת. הרשת הזו מראה מי מדבר עם מי בסרט. ככל ששתי דמויות מדברות יותר זו עם זו, כך הקו ביניהן עבה יותר. אנו מדגימים את התהליך הזה עם רשת פשוטה. אנו יכולים להשתמש בה כדרך אחת למדוד את החשיבויות של דמויות שונות בסרט לשבור את הקרת.



איור 2

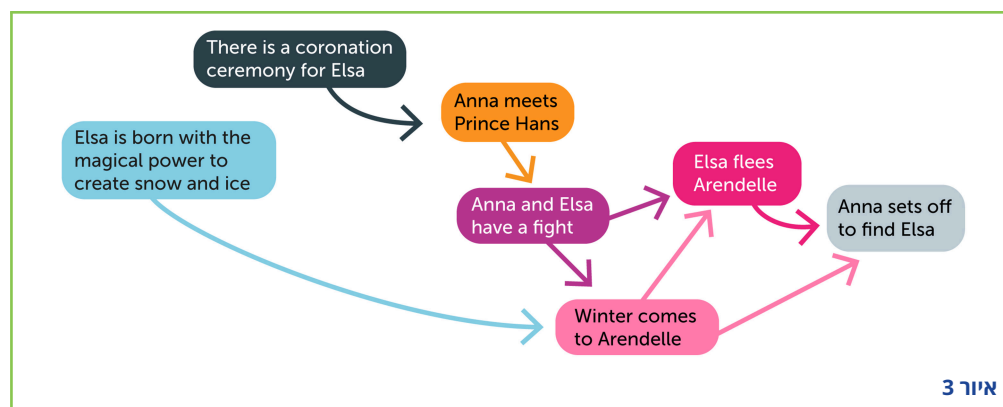
**רשתות נמצאות בכל מקום**

כעת משהדגמנו את הרעיון של חישוב מספרים כמו מרכזיות, בואו ניקח צעד אחורה. מדוע שיהיה לנו אכפת מהרשתות החברתיות והחישובים האלה? הסיבה היא שרשתות נמצאות בכל מקום בחיים שלנו, וחקירת הרשתות האלה מאפשרת לנו להבין מגוון רחב של דברים שונים [2, 3]. ניתן כמה דוגמאות.

דוגמה אחת חשובה מאוד של רשת היא האינטרנט. האינטרנט הוא רשת עולמית ענקית של מחשבים, טאבלטים, טלפונים ניידים ומכשירים אחרים שמחוברים על-ידי חוטים ודרך האוויר. אנו יכולים לחשוב על האינטרנט כמו רשת חברתית של מחשבים. לכל מחשב יש "חברים" (מחשבים אחרים שמחוברים אליו), והחברים האלה מרכיבים נתיבים לחלקים שונים ברשת, כמו ברשת החברתית של הדמויות בלשבור את הקרת. כשאתם שולחים הודעת טקסט מטלפון

### איור 3

נרטיב פשוט ולא שלם של רשת האירועים שלפני ההתחלה של לשבור את הקרח.



נייד, טאבלט או מחשב, היא מועברת הלאה לאחד החברים של המכשיר, לחבר של חברים שלו וכך הלאה, עד שבסופו של דבר ההודעה מגיעה למקבל (החבר שלכם). ידיעת התכונות של רשת המחשבים הענקית הזו חשובה מסיבות פרקטיות רבות. לדוגמה, מהנדסים רוצים לדעת אלה מכשירים חשובים יותר (מרכזיות) וכמה מכשירים בממוצע נדרשים כדי להגיע ממכשיר אחד לשני. ברשת גדולה כמו האינטרנט, האם ישנם צעדים רבים או מעטים לדעתכם [3]?

דוגמאות אחרות של רשתות הן אינטראקציות אקולוגיות בטבע. מינים ביולוגיים מתקשרים זה עם זה בדרכים שונות רבות. אחת מהאינטראקציות החשובות ביותר היא מי אוכל את מי, מה שנקרא "טריפה". אנו יכולים לבחור מין אחד (צפרדע, למשל) ולעשות רשימה של מינים אחרים שאוכלים אותו (למשל נחשים ורקונים) ושהוא אוכל אותם (כמו זבובים ותולעים). אם אנו גם יוצרים את הרשימות האלה לכל אחד מהמינים, בסופו של דבר אנו מקבלים קבוצה גדולה של קשרים (שנקראת "רשת המזון"), אשר ממחישים את יחסי הטרפה בין מינים רבים שונים. זה די שונה מחברויות ומשיחות שדנו בהן קודם, אולם אנו יכולים ללמוד הרבה על אקולוגיה על-ידי חקירת סוג הרשת הזה. לדוגמה, המרכזיות של מינים עשויה להיות אינדיקציה למידה שבה היכחדות של מין מסוים יכולה לגרום לנזק אקולוגי.

הדוגמאות האלה ממחישות את הכוח של ייצוגים מתמטיים כמו רשתות. אנו יכולים להשתמש באותם הכלים המתמטיים לחקור הרבה רשתות שונות, אף על פי שרכיבים אמיתיים של רשת – כמו דמויות, מחשבים או מינים ביולוגיים – יכולים להיות שונים מאוד. ישנן הרבה דוגמאות אחרות של רשתות נוסף על אלה שדנו בהן כאן. האם אתם יכולים לחשוב על דוגמאות בעצמכם?

### מה עוד אנו יכולים לחקור על רשתות?

בדוגמאות של רשתות שדנו בהן קודם, איננו נותנים לרשתות להשתנות אף על פי שאנשים יוצרים חברויות חדשות כל הזמן, כמו כשהם הולכים לבית ספר חדש. איננו מבחינים גם בין סוגים שונים של קשרים. בלשבור את הקרח, לדוגמה, אלזה ואנה הן אחיות, אולם אנה ואולף הם חברים.

כיום, מדענים חוקרים באופן אקטיבי דרכים להרחיב את החישובים למצבים מורכבים יותר, כמו למשל רשתות שבהן צמתים וחיבורים מתווספים, משתנים או מוקפים במהלך הזמן [4].

בגלל שהרשת של מי מדבר עם מי בלשבור את הקרח מתפתחת עם הזמן עם התקדמות הסיפור, רצוי למדוד דמויות חשובות בדרכים שמאפשרות לחשיבויות להשתנות עם הזמן. סממן חשוב נוסף של רשתות חברתיות הוא שישנם הרבה סוגים של קשרים בבת אחת, לא רק חברויות; וחוקרים מפתחים באופן אקטיבי דרכים למדוד צמתים חשובים באופן שמשלב בין קשרים מרובים. זה מועיל לא רק לרשתות חברתיות אלא גם לסוגים אחרים של רשתות. בטבע, לדוגמה, חיות לא רק אוכלות זו את זו; הן גם מתקשרות זו עם זו בדרכים שונות, והמבנים החברתיים המורכבים שלהן תלויים בקשרים המגוונים האלה [5].

חקר רשתות הוא תחום מחקר מרגש שמקשר בין רעיונות מתחומי המתמטיקה, מדעי החברה, פיזיקה, מדעי המחשב, אקולוגיה ונושאים רבים אחרים. בעיה אחת עיקרית בניית רשת היא קביעת הדרכים הטובות ביותר למדוד את חשיבותם של אנשים, חיות וישויות אחרות. דרך ההדגמה שלנו עם הסיפור של לשבור את הקרח, נתנו לכם חלון הצצה לתחום המחקר המרגש הזה.

## תודות

אנו אסירי תודה ל-Anthony Jin, Ana Gershenson, Maria Chrysafis, Nia Chiou, Austin Wu, Kate Van Hooser, Martha New, Veda Montgomery, Marlon Montgomery, Carlos Gershenson, Christina Chow, Lyndie Chiou, Steve Van Hooser ו-Steve New עבור הקישור בינינו והפצרה לקבל מהם משוב. אנו מודים לשני הסוקרים והמנטורים המדעיים שלהם על ההערות הבונות ויקרות הערך שלהם. לבסוף אנו מודים ל-Susan Debad על עריכה זהירה של כתב היד שלנו במטרה לגרום לו להיות נגיש יותר לקהל הצעיר שלנו.

## מקורות

1. Bearman, P., Moody, J., and Faris, R. 2003. Networks and history. *Complexity* 8:61–71. doi: 10.1002/cplx.10054
2. NetSciEd. (Eds). 2015. Network Literacy: Essential Concepts and Core Ideas. Available online at: <http://tinyurl.com/networkliteracy>. (Accessed 5 July, 2019).
3. Newman, M. E. J. 2018. *Networks*, 2nd Edn. Oxford: Oxford University Press.
4. Taylor, D., Myers, S. A., Clauset, A., Porter, M. A., and Mucha, P. J. 2017. Eigenvector-based centrality measures for temporal networks. *Multiscale Model. Simul.* 15:537–74. doi: 10.1137/16M1066142
5. Finn, K. R., Silk, M. J., Porter, M. A., and Pinter-Wollman, N. 2019. The use of multilayer network analysis in animal behaviour. *Anim. Behav.* 149:7–22. doi: 10.1016/j.anbehav.2018.12.016

פורסם אונליין: 28 בינואר 2021

נערך על ידי: Lorelei Koss, Dickinson College, United States

**ציטוט:** Holme P, Porter MA and Sayama H (2021) מי הדמות החשובה ביותר בלשבור את הקרח? מה רשתות יכולות להגיד לנו על העולם. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2019.00099-he

#### תורגם והותאם:

Holme P, Porter MA and Sayama H (2019) Who Is the Most Important Character in Frozen? What Networks Can Tell Us About the World. *Front. Young Minds* 7:99. doi: 10.3389/frym.2019.00099

**הצהרת ניגוד אינטרסים:** המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

**COPYRIGHT** © 2019 © Holme, Porter and Sayama 2020. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

## סוקרות צעירות

### CHLOE, גיל: 14

היי. קוראים לי Chloe ואני בת 14. בדיוק סיימתי את כיתה ט והמקצוע האהוב עליי הוא מתמטיקה. אני משחקת כדורגל, בייסבול ולאקרוס.



### STEFANIA, גיל: 15

קוראים לי Stefania. אני בת 15 ואוהבת מוזיקה, במיוחד כשאני עצובה. אני נהנית לבלות את זמני הפנוי עם חברים קרובים ועם המשפחה שלי. התכונות שלי הן שאני חברותית מאוד ואוהבת לסייע בכל הזדמנות שיש לי.



## הכותבים

### PETTER HOLME

פרופסור במכון טוקיו לטכנולוגיה. הוא אוהב מדע (בעיקר של רשתות), עוגות, מוזיקה משונה, סניקס, שחמט וסקי. למרות (או אולי בגלל) שהוא גדל בעיירה שקטה מאוד בשבדיה, הוא אוהב לחיות בעיר עמוסה כמו טוקיו. הרבה דברים בלשבור את הקרח היו בהשראה של שבדיה ושל פולקלור סקנדינבי, אז כש-Petter היה ילד הוא שמע סיפורים על טרולים שמשחקים בשלג עם חברים שנקראים Hans, Sven, Elsa, Anna, Kristoffer (לא Kristoff). הוא גם היה צריך לעצור את המכונת שלו כמה פעמים כדי לאפשר לאיילים לחצות את הכביש. Petter חושב שאלוהי הדמות הכי טובה בלשבור את הקרח, מאחר שהסרט עושה עבודה טובה ומסביר את הקונפליקט הפנימי שלה בלי להיות מפורש מדי. \*holme@cns.pi.titech.ac.jp



### MASON A. PORTER

פרופסור במחלקה למתמטיקה באוניברסיטת קליפורניה, לוס אנג'לס. הוא נולד בלוס אנג'לס והתרגש מלהפוך לפרופסור בעיר הולדתו. נוסף על חקירת רשתות ונושאים אחרים במתמטיקה וביישומיה, Mason אוהב מאוד משחקים מכל הסוגים, פנטזיה, בייסבול, את שנות ה-80 ודברים כיפיים אחרים. Mason היה





בעבר פרופסור באוניברסיטת אוקספורד, שם מדי פעם הוא לבש גלימות (כמו בסיפורי הארי פוטר). הדמות האהובה עליו בלשבור את הקרח היא אנה מאחר שהיא אמיצה וקשוחה בלי שהיא זקוקה לכוחות קסם כדי לעשות זאת. Mason אהב מאוד את ההצצה המקדימה ללשבור את הקרח 2 בסוף הסרט השני של ראלף ההורס.



### HIROKI SAYAMA

פרופסור במחלקה למדע המערכות והנדסת תעשייה באוניברסיטת בינגהמטון, אוניברסיטת מדינת ניו-יורק, ארצות הברית. במקור הוא מאומת הנינטנדו, מאנגה ועוד תרבויות שונות ומשונות אחרות (כמו יפן), הוא חנון מחשבים שאוהב משחקי וידיאו קלאסיים, קריקטורות ובדיחות של חנונים. לעיתים קרובות הוא יוצר איורי קו גרועים (אתם יכולים לראות חלק מהם באיור למעלה). הדמות האהובה על Hiroki היא קריסטוף מאחר שבאמת אכפת לו מאנה ומאנשי ארנדל, והוא יוצא מגדרו כדי לסייע להם, וגם Oaken (בעלת החנות) בגלל שהיא דמות בלתי נשכחת

Hebrew version  
provided by

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ע.ר.)  
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس  
Bloomfield Science Museum Jerusalem

