מכון טכנולוגי חולון
Holon Institute of Technology

מודלזציה ואופטימיזציה של תהליכי אספקת חיסונים נגד שפעת

פרויקט מספר: 351

מנחה הפרויקט: ד"ר אריאל בניס

חברי הצוות:

אפי מורד, אוהד פרץ, יקיר לוי

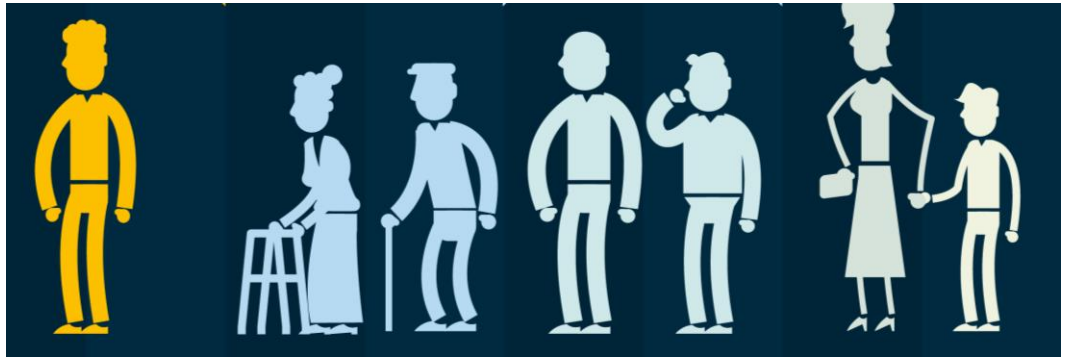
מבוא

- שפעת הינה מחלה נגיפית מדבקת, דרכי ההדבקה הן על-ידי פיזור הנגיף לסביבה בעת שיעול, עיטוש או מגע עם הפרשות מהאף וליחה, שמפיצים תרסיס של טיפות רוק מיקרוסקופיות המכיל כמות גדולה של הנגיפים.
- שפעת עלולה לגרום למחלה קלה עד קשה, ולעתים יכולה להוביל למוות.
- חיסונים נגד מחלת השפעת הינם האמצעי הכי טוב למניעת הדבקות.

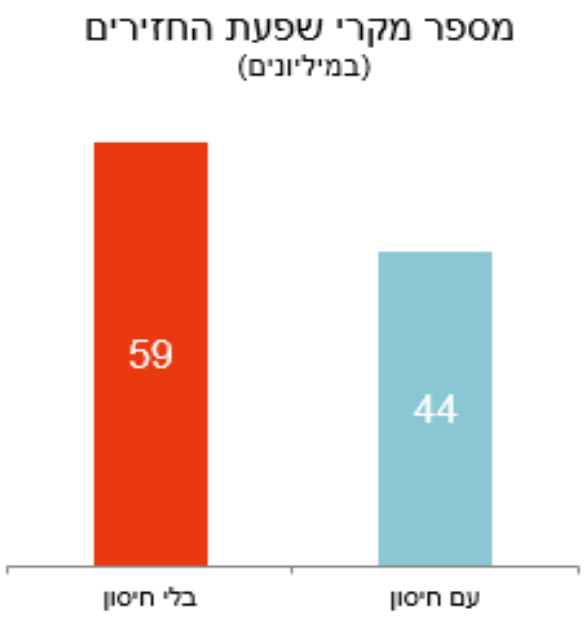
האם הורים לילדים מדביקים יותר?

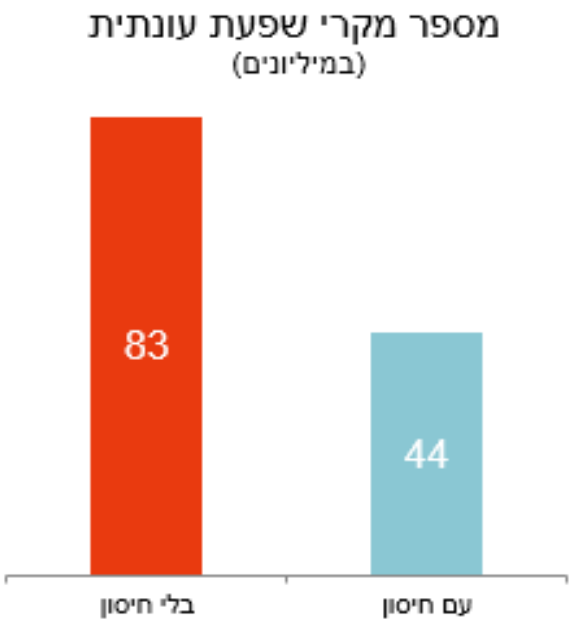
הבעיה

- על מנת שהחיסון יהיה יעיל בקרב האוכלוסייה יש לספק אותו בכמות ובזמן הנכונים.
- נגיף השפעת משתנה משנה לשנה ולכן בתחילת כל עונת שפעת איננו יודעים לחזות מראש את מקדמי ההדבקה והתחלואה הצפויה.
- במשבר הקורונה דובר רבות על הדרך היעילה ביותר למנוע את התפשטות הנגיף בחברה הישראלית, ועלתה השאלה איזו אוכלוסייה לחסן קודם, מבוגרים או ילדים.



סקירת ספרות

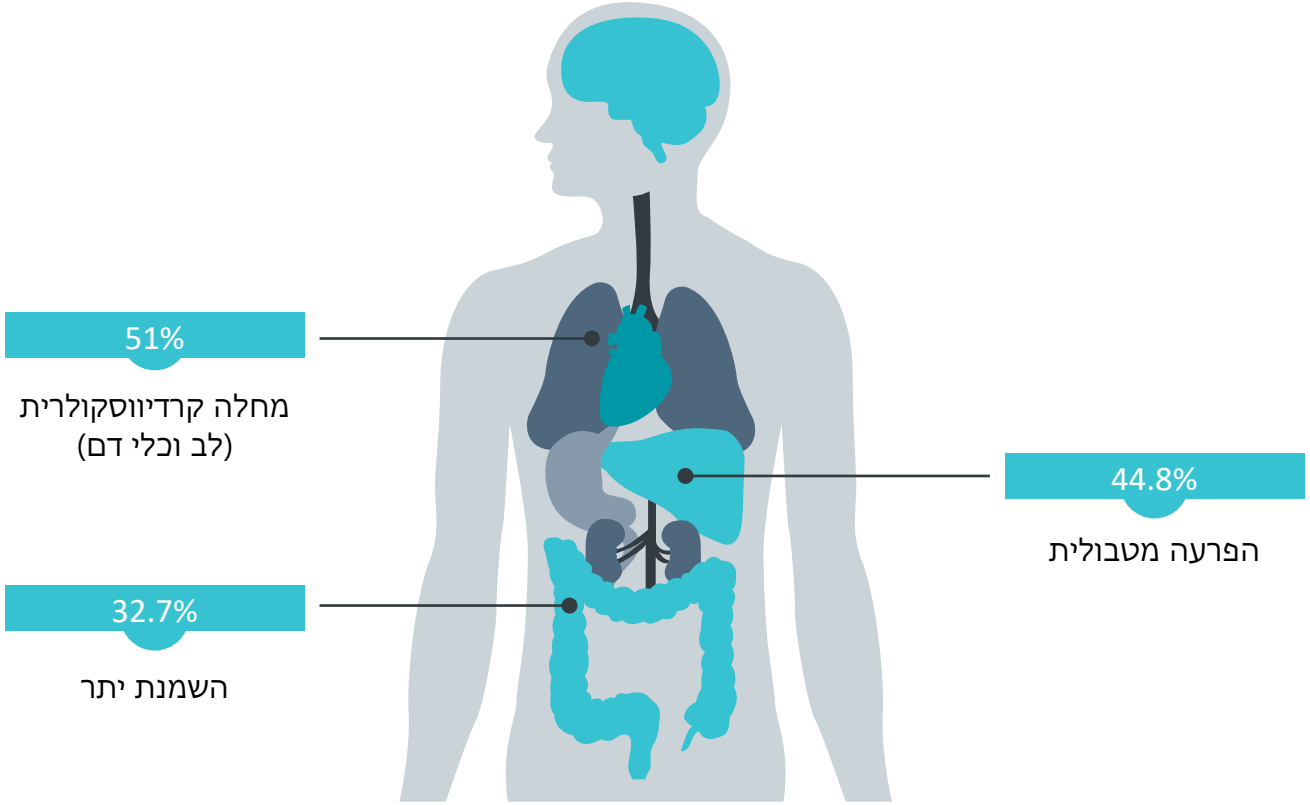




חיסון של ילדים ובוגרים צעירים (נוסף על קשישים) היה יכול לצמצם את מספר מקרי השפעת

(Medlock & Galvani, 2009)

סקירת ספרות



נתונים מעונת השפעת בשנים
2014 - 2015 בארצות הברית

הראו כי 94% מהמבוגרים
שאושפזו עם שפעת סבלו ממחלת
רקע אחת או יותר

הנפוצות ביותר היו :

(*Morbidity and Mortality Weekly Report*, 2015)

מטרת הפרויקט

מטרת הפרויקט הינה חיזוי של קבוצת האוכלוסייה אשר נמצאת בחשיפה גבוהה יותר להדבקות בנגיף, על ידי בחינת חלופות באמצעות סימולציה, לטובת אופטימיזציה של תהליך אספקת החיסונים.

בלימת שרשרת הדבקה

מתודולוגיה - מודל האופטימיזציה

SIR - מודל היסוד לתיאור מגפה

במודל זה מסווגת האוכלוסייה לשלוש קבוצות:

- המועדים - Susceptibles
- המודבקים - Infected
- המחוסנים - Recovered

מספר הנכללים בכל אחת מהקבוצות הללו מסומן באותיות S,I,R בהתאמה.

באמצעות מודל ה-SIR ניתן לחשב את התפתחות המגפה בזמן, על ידי שיעור האוכלוסייה שתחלה, משך המגפה ומספר בני האדם שיחלו בשיאה.

מתודולוגיה - מודל האופטימיזציה

בפרויקט שלנו בחרנו להרחיב את מודל ה-SIR הבסיסי ולהוסיף קבוצות של מתחסנים (V), חולים קל (Ie), חולים קשה (Ih) ומתים (D).
על ידי הרחבה זו ניתן לקבל הערכה טובה יותר של תהליך ההתחסנות ואספקת החיסונים באוכלוסייה.
הנחות היסוד במודל זה הינם :

- רק מועדים מתחסנים.
- מתחסנים לא יכולים להדבק.
- נדבקים שהבריאו לא יכולים להדבק שוב ולא צריכים להתחסן.

מתודולוגיה - מודל האופטימיזציה

משתנים :

ρ – קצב התחסנות

μ – קצב תמותה

γ_e – קצב החלמה ממחלה קלה

γ_h – קצב החלמה ממחלה קשה

β_e – קצב הדבקה קל

β_h - קצב הדבקה קשה

N – סך כל האוכלוסייה

$V_{(t)}$ – מספר מחוסנים בזמן נתון

$S_{(t)}$ – מספר מועדים בזמן נתון

$Ie_{(t)}$ – מספר חולים קל בזמן נתון

$Ih_{(t)}$ – מספר חולים קשה בזמן נתון

$R_{(t)}$ – מספר מחלימים בזמן נתון

$D_{(t)}$ – מספר מתים בזמן נתון

משוואות דיפרנציאליות :

$$S_{(0)} = N - V_{(0)} - Ie_{(0)} - Ih_{(0)}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\rho * V * S}{N}$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta e * Ie * S}{N} - \frac{\beta h * Ih * S}{N} - \frac{\rho * V * S}{N}$$

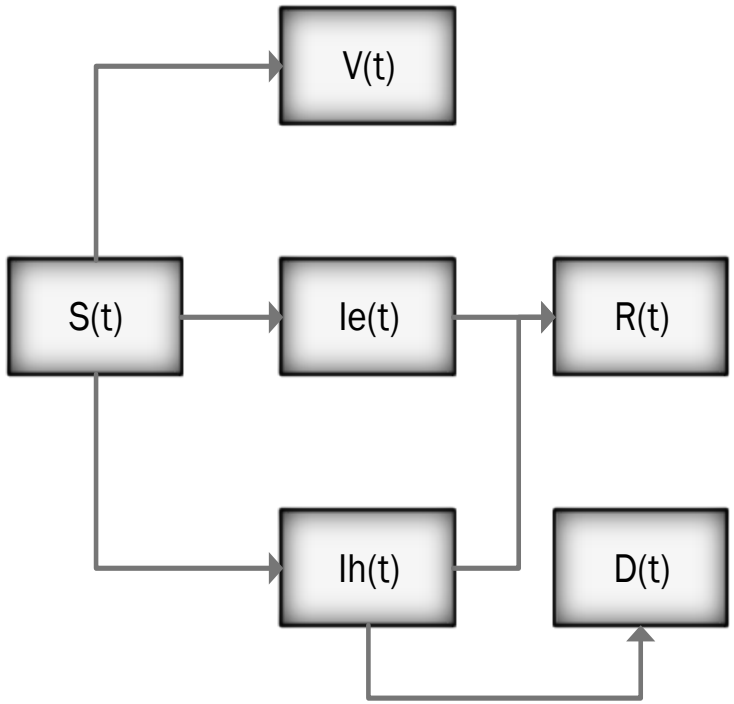
$$\frac{dIe}{dt} = \frac{\beta e * Ie * S}{N} - \gamma_e * Ie$$

$$\frac{dIh}{dt} = \frac{\beta h * Ih * S}{N} - \gamma_h * Ih - \mu * Ih$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma_e * Ie + \gamma_h * Ih$$

$$\frac{dD}{dt} = \mu * Ih$$

תרשים מעברים :



מתודולוגיה - שיטת עבודה

מתודולוגיה - איסוף נתונים

קבוצות אוכלוסייה

- אספנו נתונים סטטיסטים, כמותיים על קבוצות אוכלוסייה שונות בישראל.
- את הנתונים שאספנו הזנו לתוך אקסל ויצרנו בסיס נתונים.
- בסיס הנתונים התחלק לפי קבוצות גיל (קבוצות על) ותתי קבוצות (מעמד סוציו אקונומי, מצב משפחתי ועוד)

Age	Total	LowSES	withChildren	healthWorker	educationWorker	serviceWorker	withChronicDisease	antiVax	pregnant
0-14	2549000	0.123931	0	0	0	0	0.074590781	0.25	0
15-19	714900	0.057211	0	0	0	0.250758428	0.159573563	0.25	0.003692824
20-29	1267500	0.122288	0.436563703	0.014106509	0.015953086	0.636451598	0.450016331	0.3	0.066114398
30-44	1739300	0.116225	0.547554475	0.036365492	0.058652055	0.257671477	0.546575921	0.3	0.054182142
45-64	1708400	0.118327	0.401786594	0.052329665	0.02942993	0.157399204	0.623237321	0.25	0.000561344
65+	1074800	0.202456	0.105811203	0.049283122	0.008982928	0.083395608	0.884498977	0.15	0
Total	9053900	0.125217	0.73993848	0.024685495	0.02012028	0.197999978	0.42	0.25	0.020103602

מתודולוגיה - איסוף נתונים

משתנים

ageGroup	roh	beta_e	beta_h	gama_e	gama_h	mu
0-14	0.217	0.671428571	0.285714286	0.428571429	0.656	0.071
15-19	0.248	0.571428571	0.301428571	0.411428571	0.985	0.038
20-29	0.248	0.571428571	0.257142857	0.357142857	0.992	0.037
30-44	0.268	0.528571429	0.148571429	0.271428571	0.903	0.054
45-64	0.288	0.514285714	0.171428571	0.254285714	0.91	0.05
65+	0.602	0.385714286	0.185714286	0.214285714	0.586	0.042
Total	0.39	0.571428571	0.214285714	0.142857143	0.071428571	0.03
lowSES	0.28	0.714285714	0.357142857	0.142857143	0.05	0.037
withChildren	0.447	0.857142857	0.142857143	0.142857143	0.071428571	0.015
healthWorker	0.83	0.814285714	0.157142857	0.142857143	0.071428571	0.03
educationWorker	0.79	0.771428571	0.185714286	0.142857143	0.071428571	0.03
serviceWorker	0.39	0.714285714	0.162857143	0.142857143	0.071428571	0.03
withChronicDisease	0.386	0.385714286	0.428571429	0.071428571	0.064285714	0.065
antiVax	0	0.571428571	0.214285714	0.142857143	0.071428571	0.03
pregnant	0.39	0.571428571	0.228571429	0.142857143	0.071428571	0.03

מתודולוגיה - איסוף נתונים

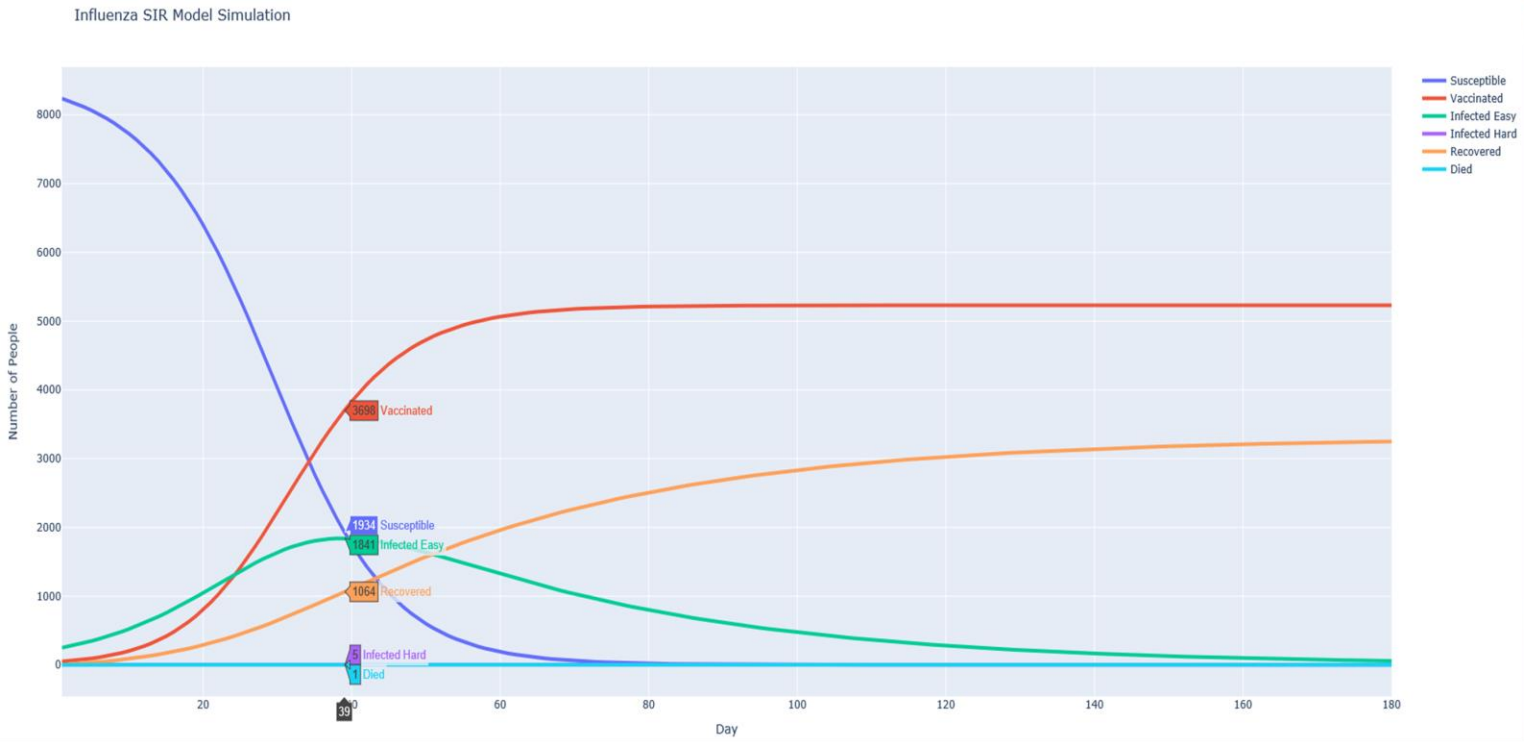
עלויות

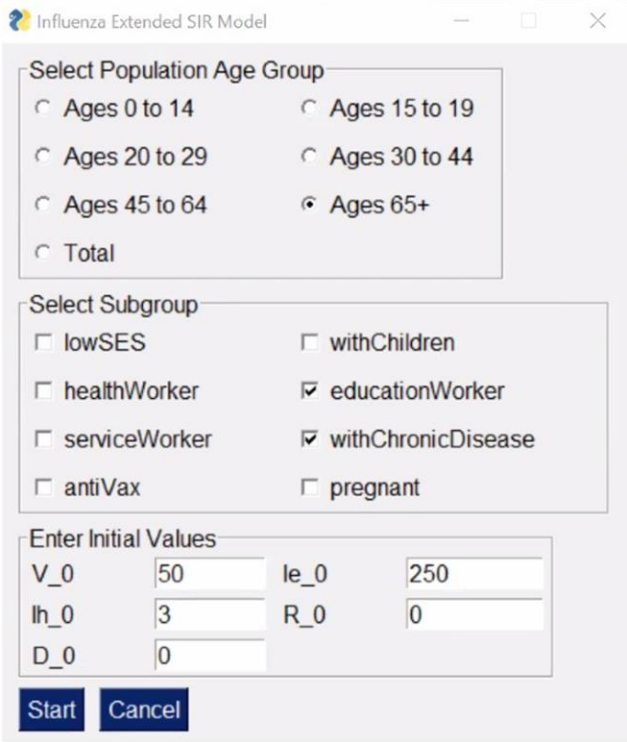
avgMinToVaccinate	hoursWorkingInMonth	nurseSalary	docSalary	pharmSalary	wastageFactor	numOfVaxInTruck_shipment
5	35.5	75	179	45	0.067	25000

costOfTruck_shipment	packagingCostPerDose	numOfVaxInTruck_distribution	costOfTruck_distribution	dose_cost
4255.02	0.5	20000	4255.02	19.8

ממצאים

תרחיש ראשון – גילאי 65 ומעלה בעלי מחלות רקע ועובדים במערכת החינוך.





Total Population	Age Group	Max Vaccinated	Max Infected Easy	Max Infected Hard	Max Died	Needed Work Hours to Vaccinate	Work Hours Cost	Vaccines Shipment Cost	Vaccines Distribution Cost	Total Cost
8,540.0	65+	5,230.0	1,841.0	5.0	1.0	436.0	32,688.0	950.0	3,978.0	148,107.0

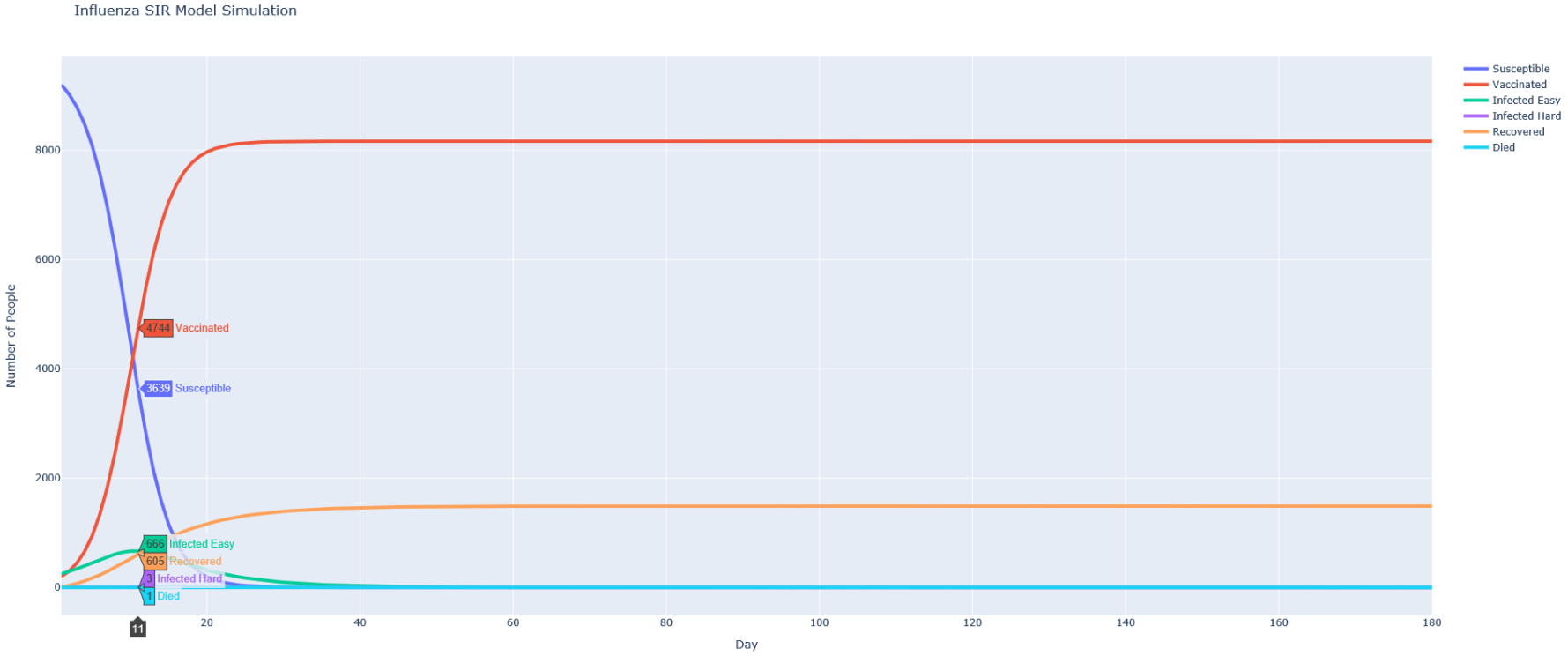
ממצאים

תוצאות תרחיש ראשון:

- כמות המתחסנים לעונת השפעת הינה 148,780 המהווה כ- 68% מכלל האוכלוסייה הנבחנת.
- כמות החולים קל המקסימלית הינה 47,113 המהווה כ- 21.6% מכלל האוכלוסייה הנבחנת.
- שיא עונת השפעת מגיעה ביום ה-32 מתחילתה כאשר עליית כמות החולים מתחילה בערך ביום ה-8 ויורדת לאזורים הנמוכים בערך ביום ה-140.
- כמות המתחסנים מגיע ביום ה-45 מתחילת עונת השפעת ל- 148,002 ומשם מתחילה להתכנס לכמות הכוללת של עונת השפעת המגיעה ביום ה-77.
- הערכת שעות העבודה הנדרשות לחסן את כלל המתחסנים באוכלוסייה הנבחרת הינה 12,399 שעות.
- הערכת העלות הכוללת לחיסון כלל המתחסנים באוכלוסייה הנבחרת הינה 4,213,258 ₪.

ממצאים

תרחיש שני– גילאי 65 ומעלה העובדים במערכת החינוך.



Total Population	Age Group	Max Vaccinated	Max Infected Easy	Max Infected Hard	Max Died	Needed Work Hours to Vaccinate	Work Hours Cost	Vaccines Shipment Cost	Vaccines Distribution Cost	Total Cost
9,655.0	65+	8,167.0	666.0	3.0	1.0	681.0	51,044.0	1,484.0	6,212.0	231,279.0

ממצאים

תוצאות תרחיש שני:

- כמות המתחסנים לעונת השפעת הינה 8,167 המהווה כ- 84% מכלל האוכלוסייה הנבחנת.
- כמות החולים קל המקסימלית הינה 666 המהווה כ- 7% מכלל האוכלוסייה הנבחנת.
- שיא עונת השפעת מגיע ביום ה-11 מתחילתה כאשר עליית כמות החולים מתחילה בתחילת העונה ויורדת לאזורים הנמוכים בערך ביום ה-35.
- כמות המתחסנים מגיעה ביום ה-21 מתחילת עונת השפעת ל-8,030 ומשם מתחילה להתכנס לכמות הכוללת של עונת השפעת המגיעה ביום ה-41.
- הערכת שעות העבודה הנדרשות לחסן את כלל המתחסנים באוכלוסייה הנבחרת הינה 681 שעות.
- הערכת העלות הכוללת לחיסון כלל המתחסנים באוכלוסייה הנבחרת הינה 231,279 ₪.

ניתוח ממצאים

שני תרחישי הבדיקה שהצגנו בוצעו על אותה קבוצת גיל והראו התפתחות לוגית מסוימת של האוכלוסייה בגילאי 65+ ושל מודל ה-SIR. בתרחישים אלה ניתן לראות כיצד קריטריון של מחלות רקע משפיע על משך המגפה ומספר בני האדם שיחלו לאורכה.

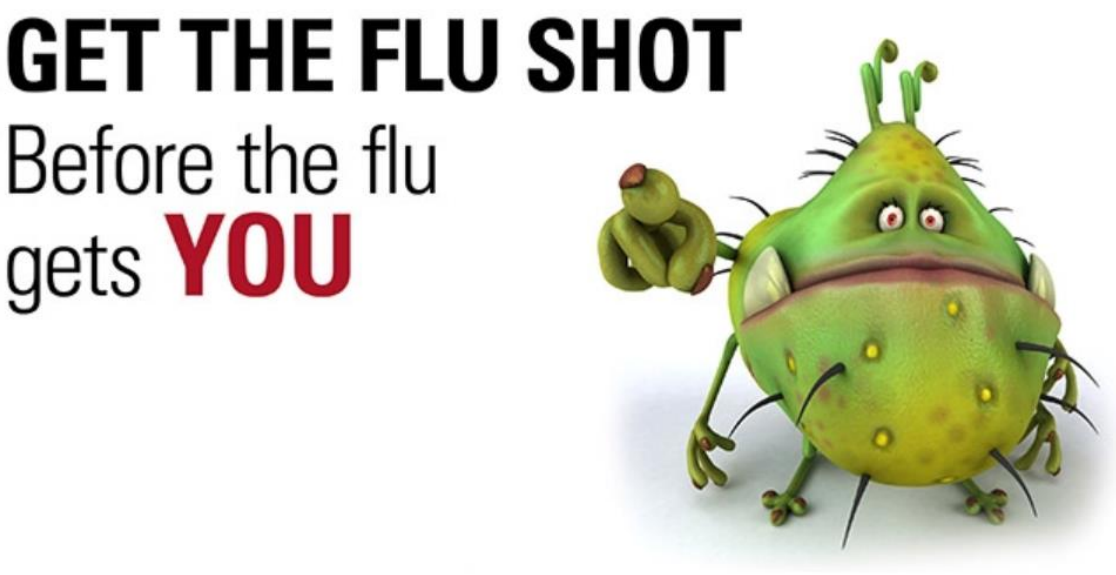
בבחינה ממוקדת ניתן לראות למשל שאדם בן 65+ בעל מחלות רקע ועובד במערכת החינוך מצוי בסיכון גבוה יותר להדבקות מאשר אותו אדם ללא מחלות רקע, לכן נעדיף לחסן את קבוצת אוכלוסייה זו קודם.

סיכום

מודל האופטימיזציה רגיש מאוד לשינויים בנתונים, היות ואנו מבצעים חלוקה לקבוצות ותתי קבוצות, ולכן יש להיות מדויקים ככל שניתן עם הנתונים המוזנים למודל עצמו.

דיוק בנתונים המוזנים למודל יוביל לחיזוי אופטימלי של זהות קבוצת האוכלוסייה שתידבק ותדביק באופן המשמעותי ביותר, כמו כן נוכל לחזות את ההוצאות הכרוכות בחיסון כלל האוכלוסייה או הקבוצה הנבחרת.

מציאת אותה קבוצה מדביקה וסיווגה כקבוצה אשר תתחסן ראשונה יכולה להפחית את מספר החולים קשה ומתים ("קטיעת שרשרת ההדבקה") ובכך להפחית משמעותית את התחלואה, העומסים בבתי החולים והוצאות המדינה וקופות החולים.



תודה רבה