

Vyhodnocení hranice saturace baterie protiraketového systému Iron Dome

Modelování a simulace

3. prosince 2022

Ladislav Vašina (xvasin11)

Dominik Vágner (xvagne10)

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Autoři a získávání informací	2
1.2	Ověření validity	2
2	Rozbor tématu a použitých technologií	2
2.1	Použité technologie	3
3	Koncepce modelu	4
4	Spuštění simulace a vstupní parametry	4
4.1	Příklad spuštění simulace	4
5	Experimenty	8
5.1	Postup při experimentování	8
5.2	Experiment č. 1 – Ověření validity	9
5.3	Experiment č. 2 – Zjištění hranice saturace baterie Iron Dome	10
5.4	Experiment č. 3 – Hypotetická situace se 100% zásahem operátorů	11
6	Závěr	12

1 Úvod

Tento dokument popisuje konceptuální model, který modeluje systém protivzdušné obrany Iron Dome. V této simulační studii si primárně klademe za cíl zjistit hranici saturace tohoto systému, jenž je hlavním pilířem izraelské obrany. Také se budeme zabírat hypotetickou situací, ve které je Iron Dome přepnut do zcela manuálního režimu.

1.1 Autoři a získávání informací

Tento projekt byl vytvořen Ladislavem Vašinou a Dominikem Vágnerem v rámci kurzu s názvem Modelování a simulace na FIT VUT v Brně.

Získávat informace o relativně moderních vojenských technologiích jako je Iron Dome je poněkud náročné. Jelikož je výrobce systému Iron Dome Rafael v celku nesdílný se specifikacemi a statistickými svými produkty, byli jsme odkázáni primárně na články obsahující rozhovory např. s operátory daného protivzdušného systému, různé experty z oboru či na oficiální vyjádření izraelských úřadů. Čerpali jsme také z článku zabírajícího se modelováním protiraketové obrany publikovaného na Brock University v Kanadě [9]. Pro detail využití získaných informací viz kapitolu o koncepci modelu 3.

1.2 Ověření validity

Ověřování validity našeho modelu probíhalo nalezením nějakého specifického raketového útoku na Izrael. Následně jsme si zjistili parametry daného útoku [7] a s těmito parametry byla spuštěna naše simulace 5.2. Jelikož se výsledky naší simulace velmi přibližovaly dostupným statistikám daného raketového útoku, tak jsme náš model označili za validní.

2 Rozbor tématu a použitých technologií

Tématem této práce je simulace systému protivzdušné obrany Iron Dome, který se primárně využívá v Izraeli, aby bránil kritické cíle jako jsou obydlené oblasti či vojenské cíle před raketovými útoky teroristických skupin.

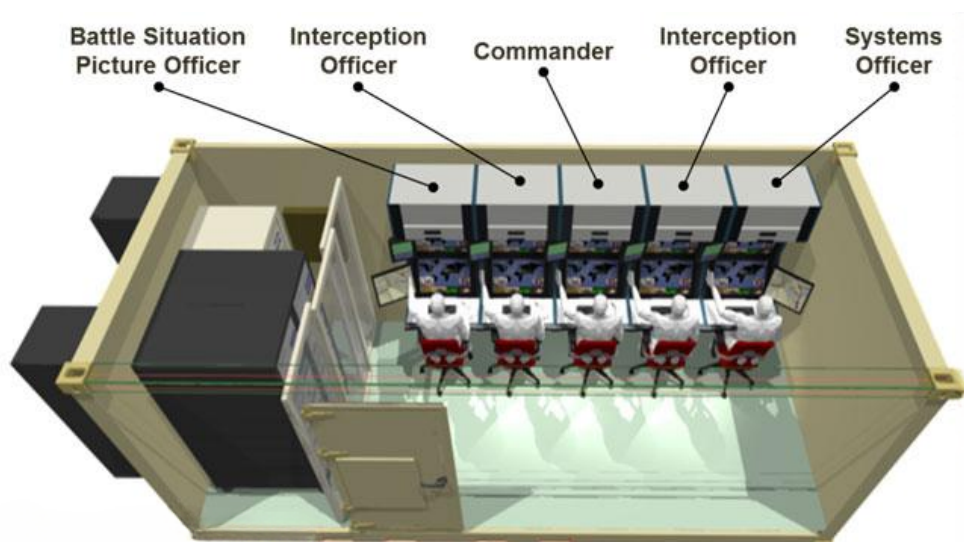
Tyto teroristické skupiny jako např. Hamás nejčastěji vystřelují své rakety na Izrael z pásma Gazy. K těmto útokům se hojně využívají podomácku vyrobené rakety s názvem Kasám (angl. Qassam), jejichž výrobní cena se udává kolem 800 \$ [8]. Kasámy jsou rakety bez naváděcího systému, které jsou zaměřovány pouze úhlem odpálení. Bezpečnostní rada Organizace spojených národů uvedla, že přibližně 20 % ze všech odpálených Kasámů z Gazy ani nedoletí do Izraele [4].

Pokud Kasám doletí do Izraele, tak je zachycen nějakou baterií systému Iron Dome. Každá baterie se skládá z:

- Radaru EL/M-2084
- BMC (Battle management and weapon control)
- 3 odpalovačů raket Tamir

Při tomto narušení izraelského prostoru je raketa sledována výše zmíněným radarem. Radar je podle některých zdrojů schopen sledovat náraz až 1200 raket zároveň [1]. Radar odesílá informace o letící raketě do BMC, kde je vypočítáno místo dopadu. Když se tímto výpočtem zjistí, že nepřátelská

raketa dopadne na místo, které není kritické, tak se takováto raketa ignoruje. Pokud se ale zjistí, že raketa letí např. na obydlenou oblast či na vojenské zařízení, je proti ní automaticky vystřelena raketa systému Iron Dome s názvem Tamir. Boji vypořádaná úspěšnost sestřelení nepřátelských raket pomocí rakety Tamir se udává přibližně 90 % [2]. Cena za každou intervenci nepřátelské rakety se pohybuje kolem 125 000 \$ [5]. Každý odpalovač raket Tamir drží 20 raket. Odpalovač lze přebíjet. Bohužel informace o přesném či přibližném času přebíjení se nám nepodařilo nikde získat. Jediná informace o přebíjení, kterou jsme našli, je fotka [3] umístěná na sociální síť Reddit, která zobrazuje proces přebíjení, jenž nám velice připomíná složení nákladního kontejneru z kamionu. Z této podobnosti jsme po zhlédnutí různých videí z vykládek kamionů vyhodnotili dobu na přebití jednoho odpalovače na cca 20 min (hodnota lze v simulaci měnit). V BMC sedí fyzicky 5 členů ozbrojených sil Izraele, kteří dohlíží na chod systému Iron Dome a z toho jsou 2 jsou tzv. zásahoví důstojníci (angl. Interception Officers). Tito důstojníci mohou zasáhnout do automatického rozhodování, zda proti raketě vystřelit či nikoliv. Procento nutnosti lidského zásahu do rozhodování o zneškodnění nepřátelských raket, délka samotného rozhodnutí a následná procentuální hodnota správnosti takového rozhodnutí se nám nepodařila nikde dohledat. V simulaci bude u těchto parametrů nastavena základní hodnota, která bude možná nastavit uživatelem.



Obrázek 1: Popis operátorů v BMC

2.1 Použité technologie

Na základě sesbíraných dat jsme vytvořili Petriho síť 2, která simuluje baterii protivzdušné obrany Iron Dome. K implementaci Petriho sítě jsme využili jazyk C/C++ s využitím knihovny SIMLIB [6].

3 Koncepce modelu

Náš model simuluje v rozmezí jednoho dne reakci baterie systému protivzdušné obrany Iron Dome na určité množství vypálených raket (Kasámů) směrem k Izraeli. Raketa má určený čas, ve který v daný den vyletí proti Izraeli. Po vstoupení do systému je raketa zachycena a začne být sledována radarem, který je v Petriho síti modelován jako sklad s kapacitou 1200. Následně je uživateli umožněno zvolit jaké množství nepřátelských střel bude potřebovat lidský zásah (v základu 5 %), délka tohoto zásahu (v základu 5 s) a jaká bude lidská chyba při tomto zásahu (v základu 1 %).

Pokud bude o sestřelení či neseštělení Kasámu rozhodovat Iron Dome sám, tak je pak o každé raketě automaticky rozhodnuto, zda ji je potřeba sestřelit. Pokud ne, tak ji radar přestává sledovat. Pokud ano, je při dostatečné kapacitě zásobníků tří odpalovačů v baterii vyslána raketa Tamir. Ta buďto s 90% úspěšností sestřelí nepřátelský Kasám nebo ho neseštělí a Kasám trefí kritický cíl. Pokud bude mít některý z odpalovačů prázdný zásobník, začne se přebíjet v předem definované délce.

Pokud bude o sestřelení či neseštělení Kasámu rozhodovat operátor v BMC, je nejdříve zjištěno, zda udělal ve svém úsudku operátor chybu. Pokud chybu udělal a nepřátelská raketa míří na kritický cíl, není proti ní vyslána žádná raketa Tamir a Kasám dopadne na kritický cíl. Pokud operátor chybu ve svém úsudku neudělal, pokračuje se stejně jako v předchozím odstavci. Jelikož jsou zásahoví operátoři v BMC pouze 2, je možné, že raketa bude potřebovat zásah operátora, ale operátor nebude v potřebný moment dostupný. Pokud danou raketu nezvládne operátor obsloužit a Kasám zatím stihne dopadnout, je s pravděpodobností 33 % rozhodnuto zda trefí kritický cíl či nikoliv.

4 Spuštění simulace a vstupní parametry

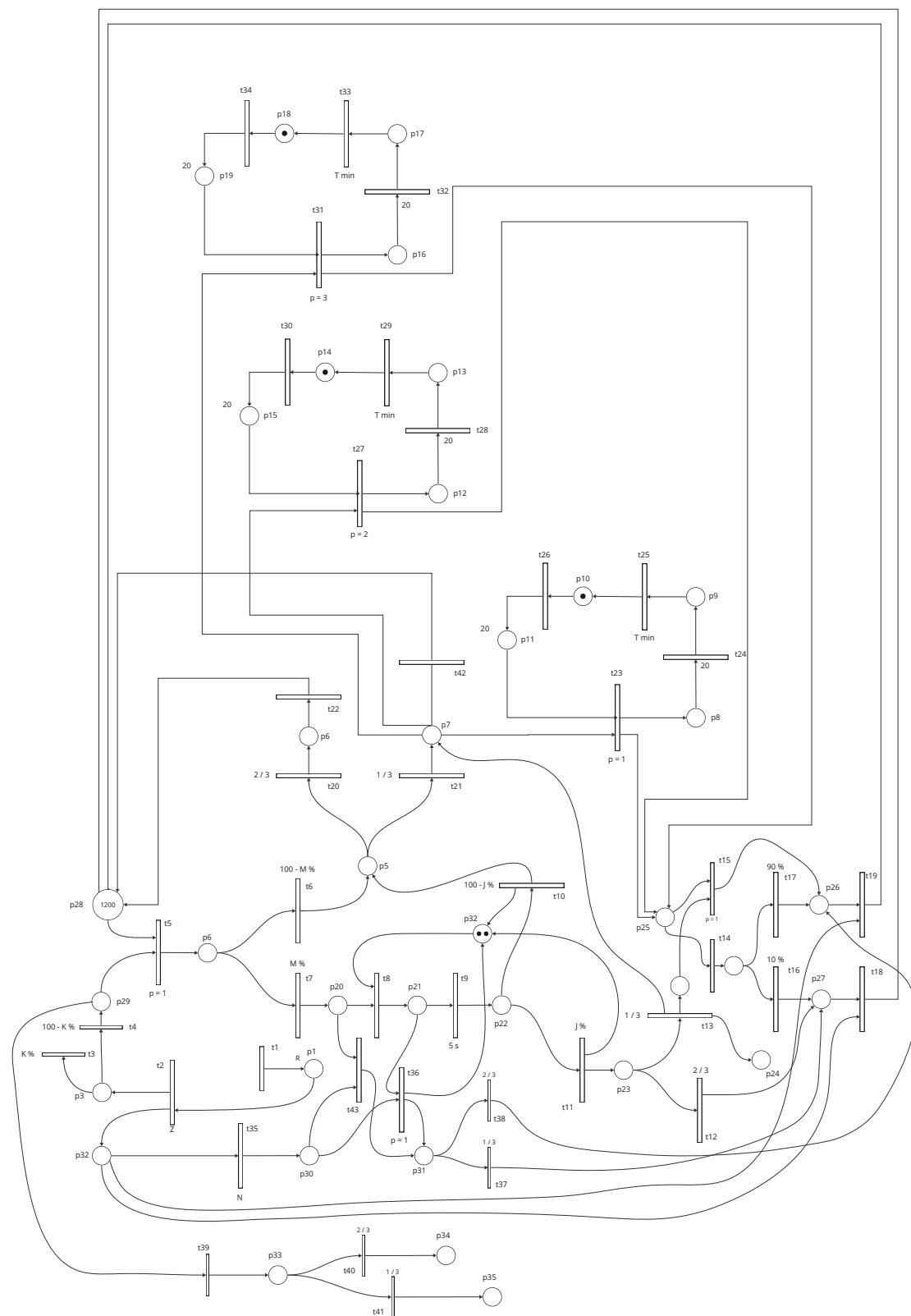
Simulace systému Iron Dome přijímá různé vstupní argumenty. Program lze spustit i bez zadání vstupních argumentů. Informace o vstupních parametrech lze získat spuštěním programu s argumenty `-h` nebo `--help`.

Vstupní argumenty mohou být následující:

- -R: Kolik Kasámů mají teroristé na den (základ 300)
- -Z: Za jak dlouho teroristé vystřelí svoji zásobu raket [min] (základ 360 min)
- -J: Lidská chyba [%] (základ 1 %)
- -K: Poruchovost Kasámů [%] (základ 20 %)
- -M: Procento Kasámů potřebujících intervenci operátora [%] (základ 5 %)
- -N: Normální rozložení času letu Kasámů [s] (základ 30 s)
- -T: Čas potřebný k přebití odpalovače Tamírů [min] (základ 20 min)

4.1 Příklad spuštění simulace

```
./main -R 1000 -Z 730 -J 2 -K 30 -M 10 -N 25 -T 15
```



Obrázek 2: Petriho síť znázorňující baterii PVO Iron Dome

Tabulka 1: Význam pozic v Petriho síti

Pozice	Význam	Pozice	Význam
p1	Raket Kasám za den	p3	Rakety Kasám vystřeleny
p4	Rakety Kasám detekovány	p5	Detekované rakety Kasám, které nepotřebují zásah operátora
p6	Iron Dome se rozhodl nezasahovat	p7	Iron Dome se rozhodl zasáhnout
p8, p12, p16	Počítadlo vystřelených raket jednotlivých raketometů	p9, p13, p17	Je potřeba přebít jednotlivé raketometry
p10, 14, p18	Jednotlivé raketometry	p11, p15, p19	Zbylá munice raketometu
p20	Iron Dome čeká na operátora střelby	p21	Iron Dome se připravuje na zpracování rozhodnutí operátora
p22	Operátor se rozhodl	p23	Operátor se špatně rozhodl
p24	Počítadlo zbytečně vystřelených Tamírů	p25	Tamir letí ke Kasámu
p26	Kasám nezasáhl kritický cíl	p27	Kasám zasáhl kritický cíl
p28	Kapacita radaru ve sledování raket	p29	Kasám nespádl již v pásmu Gazy
p30	Raketa dopadla před tím než ji stihl operátor zpracovat	p31	Kasám nezachycený operátorem
p32	Kapacita operátorů v BMC	p33	Nezachycené Kasámy radarem
p34	Počet nesledovaných raket, které se netrefily	p35	Počet zasáhnutých kritických cílů nesledovanou raketou

Tabulka 2: Význam přechodů v Petriho síti

Přechod	Význam	Přechod	Význam
t1	Vygenerování počtu raket na den	t2	Odpálení Kasámů
t3	Kasám dopadl ještě v Gaze	t4	Kasámu se podařilo přeletět do Izraele
t5	Kasám je zachycen radarem	t6	Iron Dome bude střílet bez zásahu operátora
t7	Iron Dome potřebuje k vystřelení zásah operátora	t8	Operátor je připraven rozhodnout jak zasáhnout proti Kasámu
t9	Operátor se rozhoduje	t10	Operátor se rozhodl a neudělal chybu
t11	Operátor se rozhodl a udělal chybu	t12	Operátor chybně vyhodnotí, že není potřeba sestřelit Kasám
t13	Operátor chybně vyhodnotí, že je potřeba sestřelit Kasám	t14	Tamir letí ke Kasámu mířícímu na kritický cíl
t15	Tamir letí ke Kasámu nemířícímu na kritický cíl	t16	Tamir nesestřelil Kasám
t17	Tamir úspěšně sestřelil Kasám	t18, t19	Radar přestává sledovat vybuchnutou raketu a radar už nemá co sledovat
t20	Správné rozhodnutí o tom, že Kasám netrefí kritický cíl	t21	Rozhodnutí, že je třeba sestřelit Kasám
t22	Radar přestává sledovat raketu	t23, t27, t31	Kontrola zda má nějaký z raketometů nabitý Tamir
t24, t28, t32	Kontrola zda je třeba zahájit přebíjení raketometu	t25, t29, t33	Čas na přebití raketometu
t26, t30, t34	Nabití 20 raket z jednoho balíku	t35	Doba letu rakety Kasám
t36, t43	Kasám doletí do cíle dříve než ji operátor zpracuje	t37	Kasám letí na kritickou pozici
t38	Kasám neletí na kritickou pozici	t39	Kasám nemohl být zachycený raketou
t40	Kasám spadl mimo kritickou oblast	t41	Kasám se trefil do kritického cíle
t42	Raketa nebyla sestřelena kvůli nenabitým raketometům a dopadla na kritický cíl		

5 Experimenty

Podstatou experimentů bylo nejdříve ověřit validitu našeho modelu a následně zjistit míru saturace baterie Iron Dome.

5.1 Postup při experimentování

Postup při našich experimentech byl takový, že se nejdříve zvolily určité vstupní parametry simulace. S těmito parametry se simulace spustila celkem 10krát za sebou. Průběžně jsme všechny výstupní údaje ukládali do tabulky a následně je zprůměrovali.

5.2 Experiment č. 1 – Ověření validity

V roce 2012 bylo na Izrael během jednoho dne [7] z pásma Gazy vystřeleno více než 300 raket. Na Izrael údajně dopadlo 177 těchto raket. Iron Dome zasahoval celkem 71krát a z toho 56krát úspěšně zneškodnil nepřátelskou raketu. Tento experiment měl za cíl ověřit validitu našeho modelu. Naši simulaci jsme tedy spustili s parametry, které nejvíce napodobují výše zmíněný útok.

```
./main -R 320 -M 0 -K 45
```

```
+----- ENTERED ARGS -----+
| '-R' How many Qassams per day:          320 Qassams/day |
| '-Z' How long it takes to fire all rockets per day:      21600 sec |
| '-J' Percentage of human error in BMC:                  1 % |
| '-K' Percentage of Qassam failure:                      45 % |
| '-M' Percentage of Qassams that need operator intervention: 0 % |
| '-N' Normal time of Qassam flight:                     30 sec |
| '-T' Time to reload Iron Dome:                         1200 sec |
+-----+

+----- IRON DOME BATTERY STATS -----+
| Qassam Failures: |
| - Reached Israel: 176 |
| - Fell in Gaza: 144 |
| |
| Qassam Targets: |
| - Aimed at critical target: 65 |
| - Not aimed at critical target: 111 |
| |
| Iron Dome Interceptions: |
| - Tamirs launched: 65 |
| - Qassams intercepted: 57 |
| - Critical target hits: 8 |
| - Critical target hit percentage: 12.307692 % |
| - Qassams not intercepted due to launchers reloading: 0 |
| |
| BMC (Battle Management & Weapon Control unit): |
| - Missfired Tamir rockets due to human error: 0 |
| - Qassams not processed by BMC, operators took too long: 0 |
| |
| Attack and Defence Cost: |
| - Price of Qassams: 256000 $ |
| - Price of Tamirs: 8125000 $ |
| - Price of Tamirs to IDF budget: 0.033436 % |
| - Price of Tamirs to Israel GDP: 0.001687 % |
| |
+-----+
```

Z výstupu naší simulace můžeme vidět, že počet raket, který doletěl do Izraele téměř odpovídá onomu dnu, kdy proběhl daný útok. Při vzorovém útoku v roce 2012 bylo vystřeleno celkově 71 raket Tamir a 56krát Tamir úspěšně zasáhl nepřátelskou raketu.

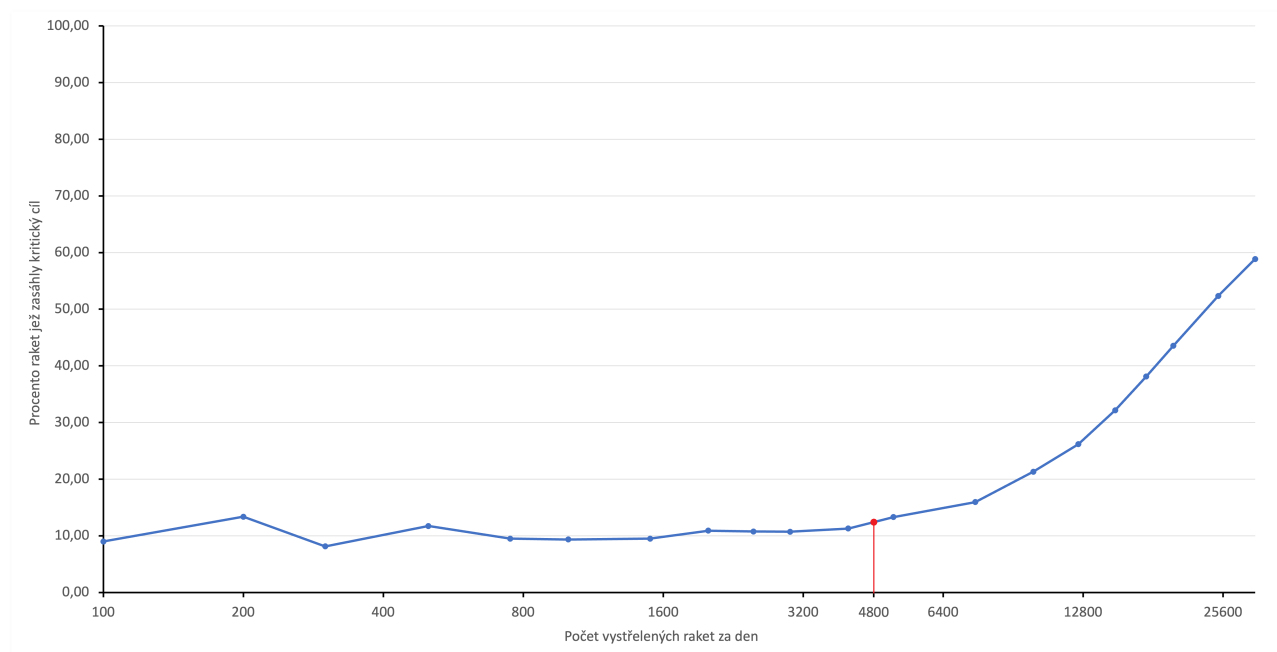
V naší simulaci Iron Dome reagoval vystřelením rakety Tamir na 65 raket. Z těchto 65 výstřelů proti nepřátelským raketám byl zásah úspěšný 56krát.

Výsledky vycházející z naší simulace se velmi přibližují výsledkům publikovaným o daném útoku z roku 2012. Z tohoto můžeme tedy usoudit, že je náš model validní.

5.3 Experiment č. 2 – Zjištění hranice saturace baterie Iron Dome

Hlavním cílem této studie bylo zjistit hranici saturace baterie systému protivzdušné obrany Iron Dome. Saturací v tomto případě rozumíme stav, ve kterém bude počet nepřátelských raket mířících na baterii takový, že baterii dojdou střely Tamir a nebude ani stíhat přebíjet, aby mohla pálit proti nově přilétajícím Kasámům. Od tohoto momentu již systém nebude mít uváděnou 90% úspěšnost a bude propouštět velké množství střel. Simulace byla spouštěna s různým množstvím střel na den a průběžně byly zaznamenávány výsledky. Počet střel (parametr -R), se kterým byla simulace v tomto experimentu spouštěna, byl v rozmezí od 100 do 30 000 raket za jeden den.

Po provedení všech simulací a následném zpracování výsledků jsme dostali následující graf.



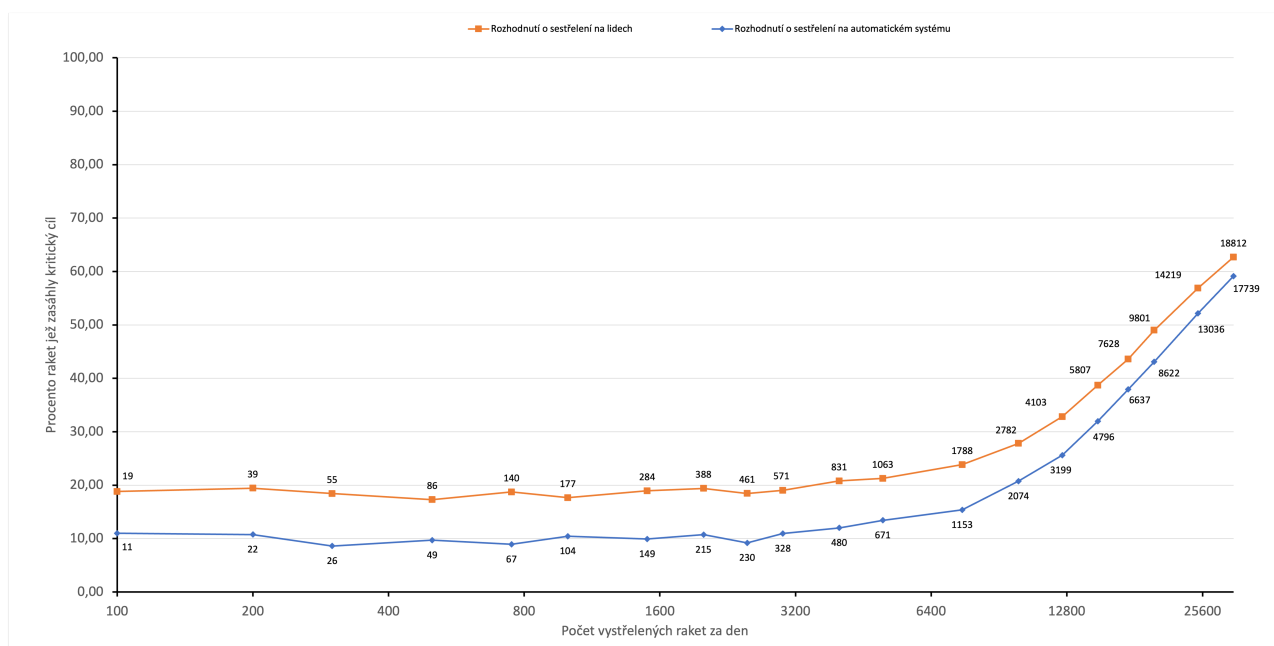
Obrázek 3: Graf zobrazující saturaci baterie Iron Dome

Graf obsahuje na ose y procento nepřátelských raket, které zasáhly nějaký kritický cíl a na ose x, která je v logaritmickém měřítku, se zobrazuje celkový počet vystřelených raket. Z grafu je patrné, že do hranice cca 4800 raket za den si systém drží výsledovanou chybovost kolem 10%. Jakmile ale hranici cca 4800 vystřelených raket za den na baterii překročíme, tak nastává saturace systému a dojde k propouštění značně většího množství nepřátelských raket.

5.4 Experiment č. 3 – Hypotetická situace se 100% zásahem operátorů

V tomto experimentu budeme simulovat situaci, ve které by byl Iron Dome nastaven do manuálního módu a veškeré nepřátelské rakety, které míří na baterii, by měly být obslouženy některým ze zásahových důstojníků, kteří jsou umístění v BMC. Simulace byla znovu spouštěna s různým množstvím střel a s parametrem M nastaveným na 100, který nám značí 100% potřebu zásahu operátora.

Po provedení všech simulací a následném zpracování výsledků jsme dostali následující graf.



Obrázek 4: Graf zobrazující saturaci baterie Iron Dome při 100% zásahu operátora

Graf obsahuje oranžovou a modrou křivku. Modrá křivka nám značí efektivitu systému Iron Dome, pokud by systém fungoval bez jakéhokoliv lidského zásahu a oranžová nám značí 100% lidský zásah. Graf také obsahuje body na křivkách zobrazující počty zásahů kritických cílů při daném množství vystřelených nepřátelských raket. Z grafu je patrné, že pokud by systém obsluhovali pouze operátoři v BMC a museli se o každé nepřátelské raketě rozhodnout, zda-li ji bude potřeba sestřelit či nikoliv, tak bude v průměru efektivita systému o 10 % nižší než tomu je v plně automatickém režimu.

Můžeme si také povšimnout, že i zde stále platí premisa z prvního experimentu, a to taková, že pokud je počet raket mířících na jednu baterii již ve vyšších tisících, tak dochází k saturaci systému protivzdušné obrany.

6 Závěr

V této studii jsme provedli několik experimentů, které nám odpověděly na různé otázky ohledně systému protivzdušné obrany Iron Dome. Na základě výsledků 1. experimentu 5.2 jsme náš model ověřili na reálných datech z teroristického útoku z minulých let. Hlavní otázku této studie jsme zodpověděli ve 2. experimentu 5.3, kde jsme zjistili, že hranice saturace baterie systému Iron Dome je přibližně 4800 raket za den. Po překročení této hodnoty začíná být systém saturován a přestává mít boji vysledovanou efektivitu 90 %. Ve 3. experimentu 5.4 simulujeme hypotetickou situaci, a to takovou, že o každé nepřátelské raketě musí být rozhodnuto jedním ze dvou zásahových důstojníků, zda bude sestřelena či nikoliv. Závěrem toho experimentu bylo, že když se do rozhodování o sestřelení raket zapojí ve 100 % člověk, tak se efektivita systému sníží přibližně o 10 %.

Použitá literatura

- [1] *EL/M-2084 radar*. [vid. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://en.missilery.info/missile/iron-dome#:~:text=in%20a%20min.-,up%20to%201200,-Deployment/cooling%20time>.
- [2] *Iron Dome 90 percent success rate*. [vid. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/article/us-palestinians-israel-irondome-idUSKBN0FF0XA20140710>.
- [3] *Iron dome reload photo*. [vid. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://external-preview.redd.it/SvRSHdy6lQ49lSBfn0jINlmPIPBrrHR7XZht7ncKM2Yw.jpg?auto=webp&s=9f7b7043a79ca2c60fe12102fb23f680ec8e50e3>.
- [4] *Qassam failure*. [vid. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.al-monitor.com/originals/2022/08/un-security-council-meets-over-gaza-fighting#:~:text=Wennesland%20said%20that%20the%20UN%27s%20assessment%20of%20the%20violence%20was%20ongoing%2C%20noting%20that%20%22some%20%20percent%22%20of%20the%20approximately%201%2C100%20rockets%20fired%20by%20armed%20Palestinian%20groups%20had%20fallen%20within%20the%20Gaza%20Strip>.
- [5] *Tamir cost*. [vid. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://nationalinterest.org/blog/reboot/iron-beam-israels-anti-missile-laser-168570#:~:text=Iron%20Dome%20interception%20costs%20around%20%24100%2C000%20to%20%24150%2C000>.
- [6] *SIMLIB/C++*. 1991. [vid. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB/>.
- [7] *Gaza-Israel clashes 2012* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. [vid. 2022-11-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Iron_Dome#cite_note-brochure-1:~:text=After%20the%20IDF,in%2071%20attempts.
- [8] *Qassam rocket*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. [vid. 2022-11-30]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Qassam_rocket#:~:text=required.%5B14%5D-,Cost,is%20up%20to%20%24800%20or%20%E2%82%AC500%20\(in%202008%E2%80%932009\)%20per%20rocket,-.%5B15%5D](https://en.wikipedia.org/wiki/Qassam_rocket#:~:text=required.%5B14%5D-,Cost,is%20up%20to%20%24800%20or%20%E2%82%AC500%20(in%202008%E2%80%932009)%20per%20rocket,-.%5B15%5D).
- [9] ARMSTRONG, M. J. Modeling Short-Range Ballistic Missile Defense and Israel's Iron Dome System. Brock University Kanada: [b.n.]. 2014, s. 13. ISSN 1526-5463.