

Optimalizace produkce salátu hlávkového ve vertikální farmě

T1: Model v průmyslové výrobě nebo zemědělství

Ondřej Hruboš

<xhrubo01@stud.fit.vutbr.cz>

Modelování a simulace — FIT VUT v Brně

2. prosince 2024

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Zdroje faktů	2
1.2	Ověření validity	2
2	Rozbor tématu	3
2.1	Vertikální farma	3
2.1.1	Hydroponický systém	3
2.1.2	Nutrient film technique (NFT)	3
2.2	Procesy na farmě	3
3	Koncepce	5
3.1	Koncepce farmy	5
3.2	Petriho síť	6
4	Implementace simulačního modelu	8
4.1	Použití a spuštění simulačního modelu	8
4.2	Popis implementace	8
5	Popis experimentů	10
6	Závěr	13

1 Úvod

Tato studie se zabývá procesy souvisejícími s pěstováním lociky seté, běžně známé jako salát hlávkový nebo jen salát[1], v prostředí vertikální farmy využívající hydroponický systém.

Studie se zaměřuje na vertikální dynamický systém z pohledu procesů. Systém byl namodelován jako SHO (systém hromadné obsluhy)[2]. Procesy na farmě jsou nejdříve popsány a následně implementovány a simulovány pomocí knihovny SIMLIB[3]. Největší ohled byl brán na maximalizaci produkce kusů salátu. Hlavním cílem experimentování bylo nalézt optimální využití zdrojů a pracovní kapacity na farmě. Byly analyzovány různé scénáře zahrnující kombinace pracovníků, stanic a dostupných zdrojů farmy, přičemž byla zohledněna reálná předloha – vertikální farma v Liverpoolu ve Spojeném království, která se specializuje na produkci salátu tímto způsobem[4].

1.1 Zdroje faktů

Dvěma hlavními zdroji informací pro tuto studii byly odborné články:

1. *Lean Principles in Vertical Farming: A Case Study*[4]
2. *Vertical farming goes dynamic: optimizing resource use efficiency, product quality, and energy costs*[5]

a webinář navazující na článek *Vertical farming goes dynamic*, kterou pořádal vydavatel *Frontiers*. Zbývající zdroje tvořily různé internetové články, z nichž byly čerpány především detaily o systému. Tyto zdroje jsou uvedeny dále v textu, kde je jasné uvedeno, na jaké informace se vztahují.

1.2 Ověření validity

Model vychází z faktů o vertikální farmě popsáných v *Vertical farming goes dynamic: optimizing resource use efficiency, product quality, and energy costs*[5] a *Lean Principles in Vertical Farming: A Case Study*[4]. Validita se opírá především o fakta zjištěná o reálném systému. Tyto fakta jsou aplikovány v simulačním modelu a podrobeny simulacím pomocí knihovny SIMLIB[3]. Bohužel jej nelze porovnat s reálnými daty, jelikož ty nebyly poskytnuty veřejně, nebo je farma nezaznamenává. Simulovaná data ovšem víceméně odpovídají odhadovaným hodnotám, která byla odhadnuta z článku *Lean Principles in Vertical Farming: A Case Study*[4].

Detailní popis systému je uveden v kapitole 3. Implementace je uvedena v kapitole 4.

2 Rozbor tématu

V této sekci jsou popsány relativní problémy k tématu. Především popis fungování vertikální farmy a procesy na farmě v Liverpoolu.

2.1 Vertikální farma

Vertikální zemědělství je způsob pěstování plodin, který se odehrává ve vnitřních prostorech budov. Rostliny mohou být náskládány na sobě (vrstvy plodin) nebo může být využito vertikální pěstební systém (věže)[5]. Vertikální zemědělství narozdíl od klasického zemědělství výrazně snižuje náklady a využívá méně zdrojů pro růst plodin. Zároveň je produkováno méně emisí dusičnanů a fosforečnanů[6].

Tento způsob pěstování plodin zároveň nabízí téměř úplnou kontrolu nad ovlivňujícími faktory, které působí na rostliny. Díky uzavřenému systému můžeme ovládat faktory jako jsou tok vody a obsah živin ve vodě, vlhkost vzduchu, teplota vzduchu, intenzita umělého osvětlení a obsah CO_2 ve vzduchu.

Nejčastějšími plodinami, které se běžně ve vertikálních farmách pěstují jsou plodiny s vysokým **harvest indexem**[6]. Tento index vyjadřuje jak velkou část plodiny můžeme prodat. Mezi takové plodiny patří: basalka pravá, čínské zelí, špenát setý, eruca vesicaria (rukola) nebo locika setá, lépe známá jako salát hlávkový[1]. Tato studie je zaměřena právě na farmu produkující salát pomocí hydroponického systému využívající **nutrient film technique (NFT)**. Techniky hydroponického systému a NFT jsou podrobněji popsány níže.

2.1.1 Hydroponický systém

Hydroponický systém je metoda pěstování rostlin bez použití půdy, při které jsou kořeny rostlin ponořeny přímo do živného roztoku. Tato technika umožňuje optimalizovat dodávku živin a vody přímo ke kořenům, což zajišťuje efektivní růst a minimální plýtvání zdroji[6].

Hydroponické systémy využívají různé techniky, jako je kapkové zavlažování, technika hluboké vody (deep water culture), nebo tenký film živného roztoku (nutrient film technique, NFT). V případě vertikálních farem je NFT oblíbenou volbou díky možnosti zajištění kontinuálního proudění živného roztoku v uzavřených kanálech.

2.1.2 Nutrient film technique (NFT)

NFT je metoda hydroponického pěstování, která zahrnuje kontinuální tok tenkého filmu živného roztoku přes kořeny rostlin. Tím je dosaženo efektivního zásobování živinami a kyslíkem při minimální spotřebě vody[5]. Tento systém je vhodný zejména pro plodiny s mělkými kořeny, jako je salát hlávkový.

2.2 Procesy na farmě

Provoz vertikální farmy zahrnuje celou řadu činností, které zajišťují efektivní růst rostlin, jejich sklizeň, balení a doručení zákazníkům[4]. Tato studie se zaměřuje zejména na **výsadbu, sklizeň a balení salátu**.

Farma disponuje sadbovacími pláty, na které se sází semínka[7]. Jeden plát pojme až 30 semínek, které následně v plátu klíčí. Až sazenice vyrostou do určité velikost, jsou přesazeny do květináčů, které také pojmu až 30 sazenic[7]. V květináčích zůstanou až do konce svého růstu.

Pracovníci se starají o několik klíčových činností, které zahrnují výsadbu semínek na sadbovací pláty, přesazování vyrostlých sazenic do květináčů a následnou sklizeň vyrostlých hlávek salátů. Kromě toho mají na starost pravidelnou kontrolu a údržbu hydroponického systému prostřednictvím ovládacího panelu, což zahrnuje zajištění správné funkce zavlažování, přísunu živin a dalších parametrů nezbytných pro zdravý růst rostlin. Tato činnost je zásadní pro prevenci jakéhokoliv poškození rostlin, například vlivem poruchy systému nebo změn v jeho nastavení.

3 Koncepce

3.1 Koncepce farmy

Na farmě jsou k dispozici dvě pracovní stanice, kde pracovníci vykonávají úkoly spojené s výsadbou semínek do sadbovacích plátů a přesazováním vyklíčených sazenic do květináčů. Každý sadbovací plát má určitou kapacitu pro semínka, a pokud plát není plně osazen, nepostupuje do další fáze růstu. Podobně každý květináč má stanovený počet sazenic, které do něj mohou být přesazeny, což také určuje kapacitu a efektivitu přesazování.

Po výsadbě semínek do sadbovacích plátů, trvá přibližně 4 až 8 dní[8], než semínka vyklíčí. Po vyklíčení jsou sazenice přesazeny do květináčů a umístěny do vertikálních věží, kde pokračují v růstu. Celkový růst rostliny trvá od 21 do 27 dní[8], než je plně vyžralá a připravená ke sklizni. Tento proces zahrnuje všechny fáze od klíčení až po dosažení požadované velikosti pro sklizeň a balení. Je zde ovšem šance, že se salát ocitne v nežádoucím stavu (choroby, škůdci, hnědé listy atd.). Pravděpodobnost, že se to stane jsou 3%[9]. V takovém případě není možno rostlinu prodat a musí být zahozena.

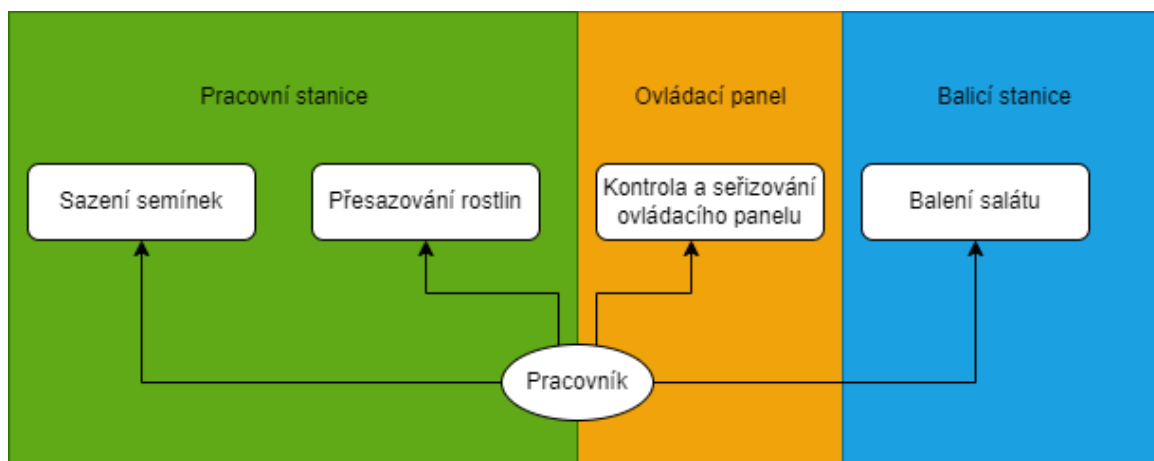
Pracovníci se na těchto stanicích starají o všechny fáze růstu rostlin, od výsadby semínek až po jejich přesazení do květináčů, jakmile rostliny vyklíčí. Po vyklíčení jsou sazenice přeneseny do vertikálních věží, kde pokračují ve svém růstu v květináčích, jejichž kapacita je stejná jako u plátů.

Když rostlina dosáhne zralosti, pracovníci ji přenesou na balicí stanici, kde je připravena k balení. Na balicí stanici se balí pouze plně vyrostlé a zralé rostliny, které byly dříve přesazeny do květináčů.

Ovládací panel je třeba kontrolovat každé 3 hodiny kdy jsou pracovníci na směně.

Pokud pracovníkům skončila směna, dokončí svou práci (připouští se přesčas) a následně jdou čekat na začátek nové směny, která začne za 16 hodin. Jedna směna trvá 8 hodin.

Na následujícím obrázku lze vidět zjednodušenou koncepci odpovídající procesům na farmě. Tento obrázek vyjadřuje závislosti úloh pracovníků na stanicích, kde je vykonávají.



Obrázek 1: Zjednodušený graf procesů na farmě

3.2 Petriho síť

Petriho síť[10] znázorňuje podrobnosti koncepce procesů na farmě na velmi nízké úrovni. Vyjadřuje zejména posloupnost a prioritu obsluhy procesů. Zobrazuje také cestu trasakce celým systémem.

Hlavním prvkem je místo pracovníků, kde transakce[2] čekají až budou moci jít obsloužit některou z linek. Pracovník může jít obsloužit linky:

1. sazení semínek
2. přesazování sazenic
3. balení salátu
4. kontrola ovládacího panelu
5. odchod ze směny

Při obslužení linky si také zaberou patřičnou stanici, která je k tomu účelu vhodná (pracovní nebo balicí stanice).

4 Implementace simulačního modelu

Simulační model byl implementován v jazyce C++ s využitím knihovny SIMLIB[3]. Implementace se odvíjí od koncepce farmy modelované pomocí Petriho sítě.

Parametry modelu se mění přímo v kódu na řádcích 9–21 označené jako `Simulation params`. Tady je prostor pro experimentování s různými parametry, včetně těch, které nelze v reálném prostředí snadno upravovat, vzhledem k omezeným financím farmy.

Lze nastavovat parametry:

- počet semínek k vysazení
- počet pracovníků obsluhující farmu
- počet pracovních stanic
- počet balicích stanic
- počet sadbovacích plátů
- počet semínek, které se vejdou na jeden sadbovací plát
- počet květináčů
- počet sazenic, které se vejdou do jednoho květináče
- délka směny
- délka simulace ve dnech
- délka simulace v minutách (používá počet dní pro výpočet délky v minutách)

4.1 Použití a spuštění simulačního modelu

Pro spuštění modelu je potřeba mít nainstalovanou knihovnu SIMLIB[3]. Tato knihovna se poté sváže s programem při překladu. Program lze přeložit pomocí nástroje `make` spuštěním příkazu `make` v kořenové složce projektu.

Simulační model lze poté spustit příkazem `make run` nebo přímým spuštěním vygenerovaného binárního souboru `./ims`. Program vygeneruje simulační data do souboru `sim.dat`.

Lze upravovat jaké statistiky se budou generovat. Ve funkci `main` na konci jsou vypsány příkazy končící `.Output()`. Tyto příkazy je možno odkomentovat a tím je vypsát do souboru.

4.2 Popis implementace

Implementace se značně odráží od Petriho sítě.

Procesy[2] reprezentují transakce, které jsou v programu realizovány třídami odvozených od

rodičovské třídy **Process**. Hlavním procesem je proces **Worker**, který má v podstatě obsluhuje celou farmu. Tento proces je každých 8 hodin přesunut do fronty **workersOut**, která realizuje konec směny v systému. Zde procesy čekají na probuzení, po kterém následně započnou znovu svou práci.

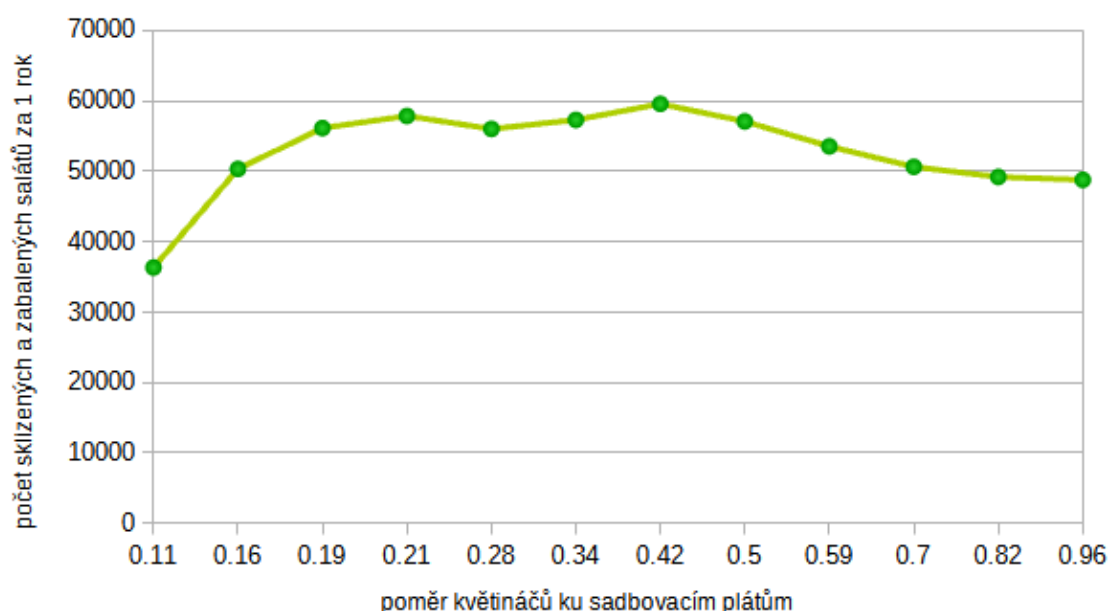
Růst semínka a sazenice jsou v systému implementovány jako jednotlivé procesy. Po dokončení procesu růstu semínka je spuštěn nový proces, který modeluje růst sazenice.

Za zmínku stojí také procesy časovaných událostí, které se periodicky opakují. K těmto procesům patří časovač směny a časovač kontroly ovládacího panelu.

5 Popis experimentů

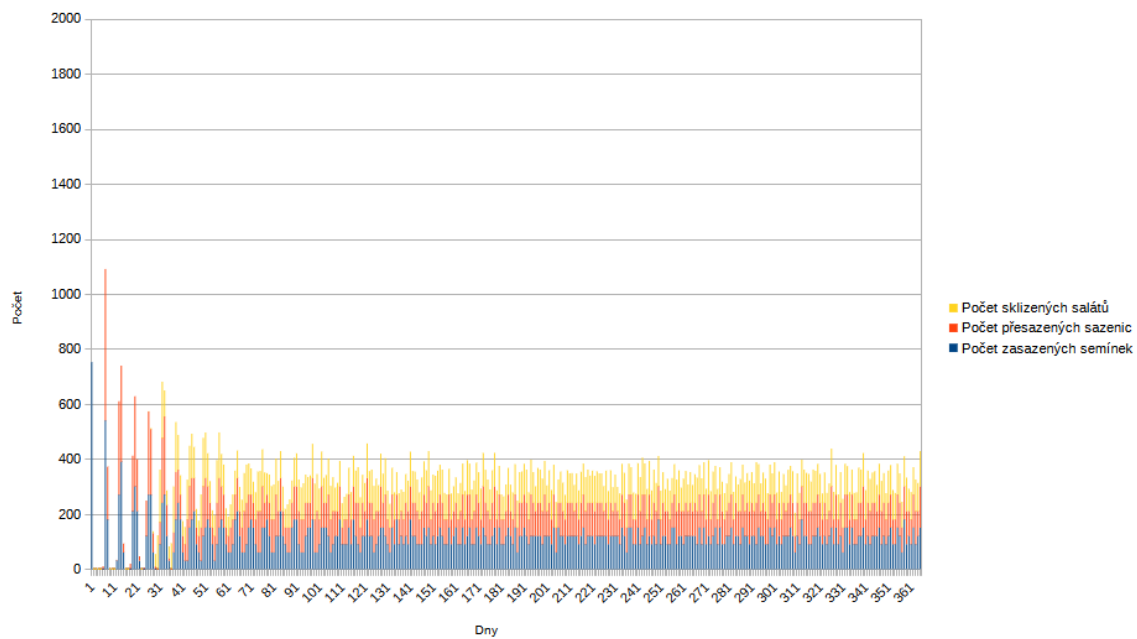
Experimenty probíhaly spouštěním simulačního modelu vícekrát, pokaždé s jinými parametry, s pevným časovým ohraničením jednoho roku. Nejprve bylo potřeba zjistit, které parametry mají vliv na produkci salátu a které lze implementovat v realitě, kde máme omezené zdroje a možnosti. Jako první bylo vyzkoušeno přidání více pracovníků do farmy, což nemělo za následek zvýšení produkce, ale naopak zahlcení systému zasazenými semínky, které následně nemohly být zpracovány. Dalším parametrem, se kterým se experimentovalo byl počet pracovních a balicích stanic. Zde byl neočekávaný výsledek, kdy přidáním jedné balicí stanice se ve skutečnosti produkce snížila. Tyto nepodařené experimenty nebyly zahrnuty do výsledků.

Ukázalo se, že optimalizace je možná zjištěním optimálního poměru sadbovacích plátů a květináčů. Díky optimálnímu poměru je možné včas zároveň sázet nová semínka, přesazovat sazenice a následně sklízet vyrostlé rostliny salátu.



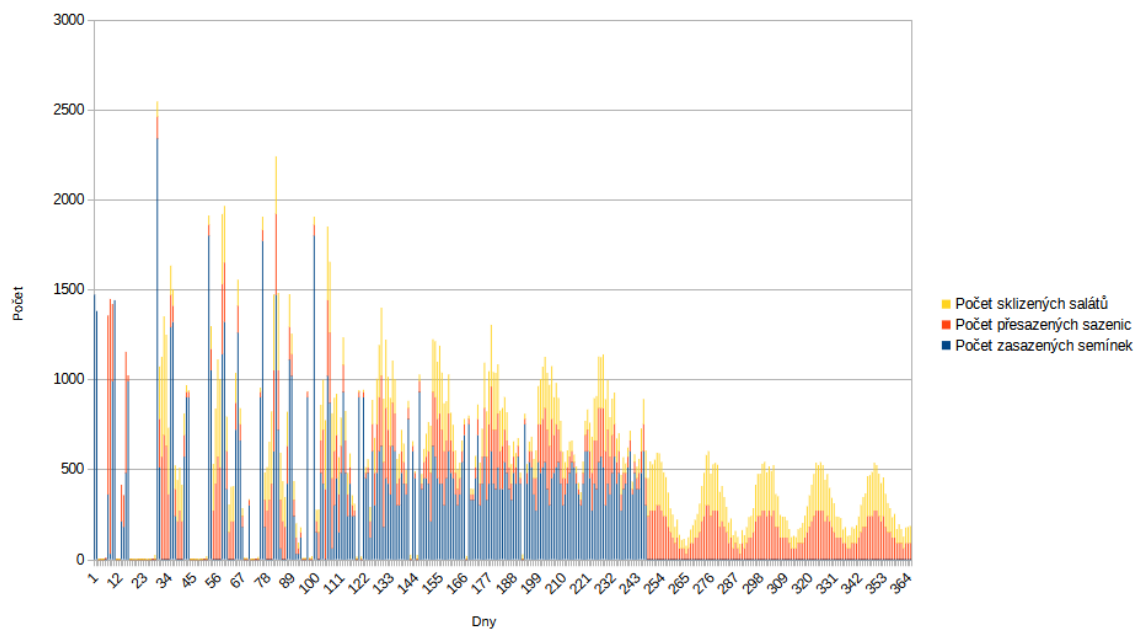
Obrázek 3: Vliv poměru sadbovacích plátů ku květináčům na sklizeň

Z grafu je jasně vidět, že optimální poměr se pohybuje okolo hodnoty 0.42. Tento poměr zajistí maximalizaci sklizně salátu. Pokud bychom se podívali na graf znázorňující jednotlivé operace v jednotlivých dnech, vidíme, že pokud je poměr moc malý, pracovníci nestíhají přesazovat a sklízet salát.



Obrázek 4: Malá produkce při poměru 0.19

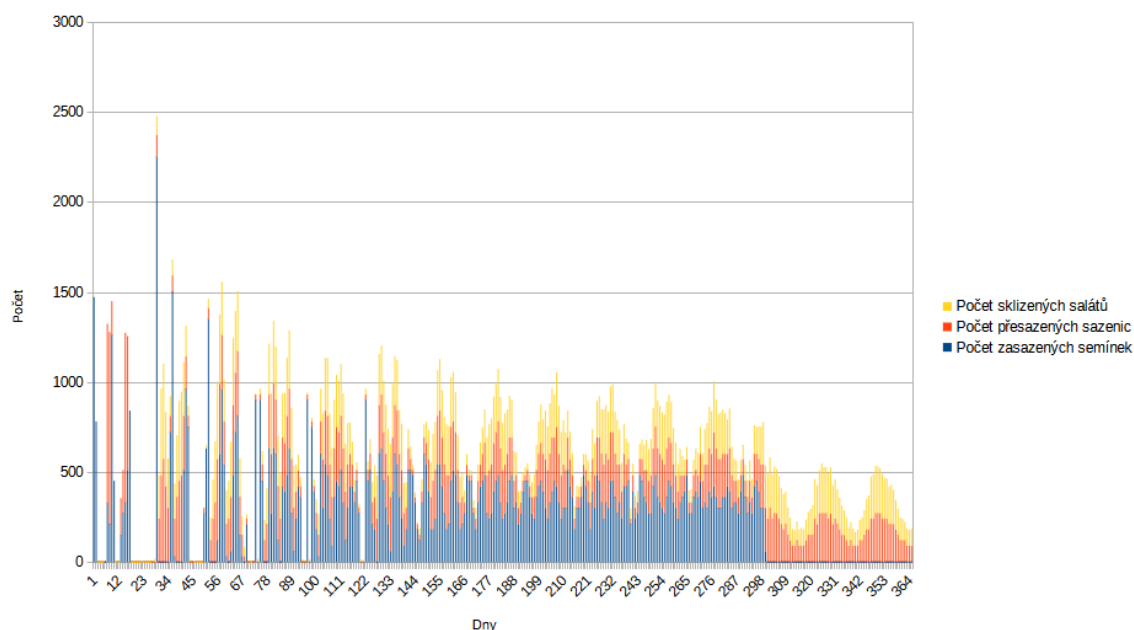
Pokud se zaměříme na opačný případ, tedy na příliš vysoký poměr, zjistíme, že na konci období pracovníci nemají možnost zasazovat nová semínka, což vede k nevyužití pracovní kapacity a zbytečné neefektivitě v produkci.



Obrázek 5: Malá produkce při poměru 0.59

Na grafu níže můžeme pozorovat ideální scénář, kdy pracovníci sázejí semínka téměř až do konce daného období. Tento případ je navíc optimalizován pro budoucí cykly, protože semínka

vyklíčí na začátku následujícího období, což umožňuje pracovníkům okamžitě začít se sklizní a tím efektivně využít dostupnou pracovní kapacitu.



Obrázek 6: Optimalizovaný poměr 0.42

Tato optimalizace je snadno realizovatelná i v reálném systému, protože nevyžaduje výrazné investice do zdrojů či financí pro její implementaci. Díky tomu může farma dosáhnout maximálního zisku z prodeje salátu, což z ní činí efektivní a nákladově výhodný přístup k optimalizaci výrobních procesů.

Podrobnosti experimentů a jejich data lze získat v příloze `sheet.ods` ve formě tabulkových dat.

6 Závěr

Výsledkem studie je diskrétní model vertikální farmy produkující salát hlávkový. Byl vytvořen na základě informací získaných z popisu firmy v Liverpoolu. Model poskytuje podrobný přehled o procesech, které na farmě probíhají, a o tom, jak jsou navzájem propojené. Díky simulaci těchto interakcí lze lépe pochopit, jak změny v jednom procesu mohou ovlivnit ostatní, a jak optimalizovat rozdělení zdrojů a pracovní síly. Tento nástroj tak umožňuje optimalizovat počet vyrostlých salátů s ohledem na dostupné zdroje farmy.

Na základě experimentování s vytvořeným modelem jsme byly schopni určit optimální parametry s ohledem na předlohu farmy v Liverpoolu, které umožňují maximalizovat produkci salátu. Bylo zjištěno, že nejlepším a nejlevnějším způsobem bylo zvolit optimální poměr sadbovacích plátů a květináčů.

Reference

- [1] Wikipedie. *Locika setá* — *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*. [Online; navštíveno 2. 12. 2024]. 2024. URL: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Locika_set%C3%A1&oldid=24186621.
- [2] Petr Peringer a Martin Hrubý. *Modelování a simulace - IMS, str. 140*. Zář. 2024. URL: <https://www.fit.vut.cz/person/peringer/public/IMS/prednasky/IMS.pdf>.
- [3] Petr Peringer. *SIMLIB/C++: SIMLIB*. URL: <https://www.fit.vut.cz/person/peringer/public/SIMLIB/doc/html/index.html> (cit. 02. 12. 2024).
- [4] Francis Baumont de Oliveira et al. „Lean Principles in Vertical Farming: A Case Study“. In: *Procedia CIRP* 93 (2020). 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020, s. 712–717. ISSN: 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.017>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120305758>.
- [5] Elias Kaiser et al. „Vertical farming goes dynamic: optimizing resource use efficiency, product quality, and energy costs“. In: *Frontiers in Science* 2 (2024). ISSN: 2813-6330. DOI: 10.3389/fsci.2024.1411259. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/science/articles/10.3389/fsci.2024.1411259>.
- [6] Elias Kaiser et al. „Vertical farming goes dynamic optimizing resource use.“ In: *Vertical farming goes dynamic optimizing resource use*. Online webinář. Frontiers. Frontiers, lis. 2024.
- [7] Ilior Hessel. *Hydroponic lettuce greenhouse factory - Automated*. Youtube. 2012. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=o1QXCnC-2h4>.
- [8] Jon M. *What is the Best Temperature for Growing Lettuce? (3 Tips)*. URL: <https://greenupside.com/what-is-the-best-temperature-for-growing-lettuce-3-tips/>.
- [9] Christopher John Kaufmann. *Reducing Tipburn in Lettuce Grown in an Indoor Vertical Farm: Comparing the Impact of Vertically Distributed Airflow vs. Horizontally Distributed Airflow in the Growth of Lactuca sativa*. 2023. URL: <http://hdl.handle.net/10150/668394>.
- [10] Petr Peringer a Martin Hrubý. *Modelování a simulace - IMS, str. 127*. Zář. 2024. URL: <https://www.fit.vut.cz/person/peringer/public/IMS/prednasky/IMS.pdf>.