

# Primjena optimizacije u sastavljanju obroka za mliječne krave

---

**Sunko, Andrija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:240216>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-11**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**AGRONOMSKI FAKULTET**

**Primjena optimizacije u sastavljanju obroka za mliječne  
krave**

DIPLOMSKI RAD

Andrija Sunko

Zagreb, srpanj, 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



Diplomski studij:

Proizvodnja i prerada mlijeka

# **Primjena optimizacije u sastavljanju obroka za mliječne krave**

DIPLOMSKI RAD

Andrija Sunko

Mentor:

Doc. Dr. sc. Ante Kasap

Zagreb, srpanj, 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## IZJAVA STUDENTA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, **Andrija Sunko**, JMBAG 0178096937, rođen 12.12.1994. u Zagrebu, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom:

### **Primjena optimizacije u sastavljanju obroka za mliječne krave**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedini autor ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
*Potpis studenta / studentice*



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## IZVJEŠĆE

### O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studenta **Andrija Sunko**, JMBAG 0178096937, naslova

#### **Primjena optimizacije u sastavljanju obroka za mliječne krave**

obranjen je i ocijenjen ocjenom \_\_\_\_\_, dana \_\_\_\_\_.

Povjerenstvo:

potpisi:

- |    |                              |        |       |
|----|------------------------------|--------|-------|
| 1. | doc. Dr. sc. Ante Kasap      | mentor | _____ |
| 2. | prof. Dr. sc. Ante Ivanković | član   | _____ |
| 3. | izv. prof. Dr. sc. Goran Kiš | član   | _____ |

## **Zahvala**

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc.-u Anti Kasapu na odabiru zanimljive teme te na strpljenju, raspravama i pomoći tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem profesorima i kolegama koji su mi na mnogo načina pomogli u traženju vlastitog puta unutar svojeg poziva. Zahvaljujem roditeljima i obitelji na neupitnoj podršci tijekom cijelog trajanja studija.

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b> .....	<b>1</b>
1.1	Cilj rada .....	1
<b>2</b>	<b>Pregled literature</b> .....	<b>2</b>
2.1	Hranidbene potrebe mliječnih krava.....	2
2.1.1	Ugljikohidrati .....	3
2.1.2	Energija .....	4
2.1.3	Masti .....	4
2.1.4	Proteini .....	5
2.2	Značaj voluminoze u hranidbi mliječnih krava.....	6
2.3	Hranidba po proizvodnim fazama .....	13
2.3.1	Suhostaj .....	13
2.3.2	Rana laktacija .....	14
2.3.3	Vrhunac laktacije.....	15
2.3.4	Sredina i kraj laktacije .....	16
2.4	Primjena optimizacije u hranidbi krava.....	17
<b>3</b>	<b>Materijali i metode</b> .....	<b>20</b>
3.1	Matematički modeli programiranja.....	20
3.2	Hranidbene potrebe i ograničenja.....	21
3.3	Sustav nejednadžbi za obrok u ranom suhostaju.....	26
3.4	Sustav nejednadžbi za obrok u kasnom suhostaju .....	28
3.5	Sustav nejednadžbi za obrok u početku laktacije .....	30
3.6	Sustav nejednadžbi za obrok u ranoj laktaciji .....	32
3.7	Sustav nejednadžbi za obrok u srednjoj laktaciji .....	34
3.8	Sustav nejednadžbi za obrok u kasnoj laktaciji .....	36
<b>4</b>	<b>Rezultati i rasprava</b> .....	<b>38</b>
4.1	Cijena koštanja obroka.....	38
4.2	Udio pojedinih krmiva u obroku .....	39
4.3	Rasprava .....	42
<b>5</b>	<b>Zaključak</b> .....	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Literatura</b> .....	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>Prilog</b> .....	<b>49</b>

7.1	Tablica mjernih jedinica .....	49
7.2	Puni naziv kemijskih komponenti .....	49
7.3	Popis slika .....	49
7.4	Popis tablica.....	50
7.5	Popis grafikona .....	50
8	Životopis .....	51



# Sažetak

Diplomskog rada studenta **Andrije Sunka**, naslova

## **Primjena optimizacije u sastavljanju obroka za mliječne krave**

Uspjeh proizvodnje u sektoru mliječnog govedarstva uvelike ovisi od biološki adekvatne i ekonomski opravdane hranidbe. Pri formulaciji obroka iz raspoloživih krmiva potrebno je uvažavati hranidbene potrebe životinja, fizička i kemijska svojstva krmiva, ograničenja u konzumaciji pojedinih krmiva te njihovu trenutnu cijenu. Uvažavajući istovremeno kompleksne hranidbene potrebe mliječnih krava i veliki broj ograničenja po pitanju konzumacije pojedinih krmiva, formulacija obroka predstavlja izazov čak i uz korištenje računala i specijaliziranih programskih rješenja. Cilj ovog rada je bio temeljem detaljno razrađenih primjera prikazati način i doprinos sastavljanja obroka s minimalnom cijenom koštanja korištenjem linearnog programiranja u R programskom okruženju. Primjenom ovog programa moguće je sastaviti obrok uvažavajući sve potrebe i ograničenja uz minimalnu cijenu koštanja. Praktična primjena ovakvih programskih rješenja još uvijek nedovoljno je zastupljena u praksi, a rezultati ovog rada trebali bi ukazati na doprinos njihove primjene, osobito kod malih i srednjih uzgajivača i u uvjetima velike varijabilnosti cijena krmiva na tržištu.

**Ključne riječi:** mliječne krave, hranidba, obrok, optimizacija, cijena

## Summary

Of the master's thesis - student **Andrija Sunko**, entitled

### **Optimization in ration formulation for dairy cows**

The success of production in the cow dairy sector largely depends on biologically adequate and cost effective nutrition. When formulating rations from available feedstuffs, it is necessary to take into account the nutritional needs of animals, physical and chemical properties of feedstuffs, restrictions on the consumption of certain feedstuffs and their current price. Taking into account at the same time the complex nutritional needs of dairy cows and a large number of restrictions on the consumption of certain feeds, ration formulation is a challenging task, even with the use of computers and specialized software solutions. The aim of this study was to examine the contribution of the least cost ration formulation using linear programming in the R programming environment. With this program, it is possible to formulate a ration, while satisfying all needs and restrictions at a minimum cost. The practical application of such software solutions is still insufficiently used in practice. The results of this study should point out the contribution of least cost ration formulation, especially in small to medium production systems and conditions of high variability of feedstuffs prices on the market.

**Keywords:** nutrition, ration, cows, optimization, cost

# 1 Uvod

Principi suvremene hranidbe u sektoru mliječnog govedarstva temelje se na podmirivanju hranidbenih potreba krava u pojedinim fazama proizvodnje koristeći različita dostupna krmiva. Obzirom da troškovi hranidbe predstavljaju veliki udio u ukupnim troškovima proizvodnje kravljeg mlijeka, pri sastavljanju obroka nastoji se voditi računa o njegovim kvantitativno-kvalitativnim osobinama ali isto tako i o cijeni koštanja obroka. Iz tog razloga, na suvremenim mliječnim farmama, a osobito onima sa visokim ulaganjima u cjelokupni proces proizvodnje, sve više se koriste razni programi koji optimiraju obroke mliječnih krava minimizirajući cijenu koštanja.

Sastavljanje obroka s minimalnom cijenom koštanja je koncept koji datira iz 1968. (Bath i sur. 1968.). Prema navodima autora koji su istraživali ovu problematiku u samim začecima primjene, ovako sastavljeni obroci ne odstupaju u kvaliteti od klasično sastavljenih obroka osim u cijeni, koja je u pravilu uvijek niža (Bath i sur. 1968.; Howard i sur., 1968.).

Od konceptualnog začetka ove metodologije, pa do danas razvijene su različite verzije programa za optimizaciju krmnih smjesa za sve vrste stoke, riba i kućnih ljubimaca čime je upotreba ovakvih programa postala pristupačna širem krugu interesanata (Pavličević, 1996.). Ipak, većina programa na tržištu su skupi i nefleksibilni (nije ih moguće prilagoditi nekim specifičnim ograničenjima i drugačijim ulaznim parametrima) što ograničava njihovu širu upotrebu u praksi.

## 1.1 Cilj rada

Cilj ovog diplomskog rada je napisati fleksibilni program za sastavljanje obroka s minimalnom cijenom koštanja rješavanjem optimizacijskog problema tehnikom linearnog programiranja u R programskom okruženju i primjerima sastavljanja obroka za mliječne krave u različitim fazama proizvodnje ukazati na mogućnost i doprinos primjene ove metodologije u praksi.

## 2 Pregled literature

### 2.1 Hranidbene potrebe mliječnih krava

Konzumacija hrane u stočarstvu najčešće se iskazuje u kilogramima suhe tvari radi „standardizacije“ krmiva s različitim udjelima vode. Unos suhe tvari pod utjecajem je i karakteristika hrane i karakteristika pojedinih životinja. Glavni čimbenici same životinje koji utječu na konzumaciju hrane su tjelesna masa, mliječnost, stadij laktacije i graviditet. Unos suhe tvari na vrhuncu konzumacije može biti i 5% tjelesne mase krave na dan, a može biti čak i više kod visoko proizvodnih grla. Ipak, prosječni vrhunac unosa suhe tvari iznosi 3,5%-4% tjelesne mase. Kod odraslih krava, unos suhe tvari najniži je tijekom perioda zasušenja, kada iznosi svega do 2% tjelesne mase. Razlika unosa suhe tvari između laktacije i zasušenja jače je istaknuta kod krava veće tjelesne mase, nego kod mršavijih jedinki. Nakon teljenja, unos suhe tvari povećava se u korelaciji sa većom proizvodnjom mlijeka. Proizvodnja mlijeka i potrebe za energijom su na vrhuncu između šestog i desetog tjedna laktacije, dok unos suhe tvari doseže svoj vrhunac tek između dvanaestog i četrnaestog tjedna. Dakle, u samom vrhu laktacije, mliječne krave troše više energije, nego što je unose putem hrane. Tijekom ovog perioda, krave su podložnije metaboličkim poremećajima (Grubić i Adamović, 2003.).

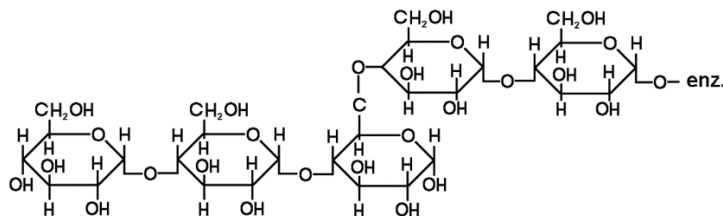
## 2.1.1 Ugljikohidrati

Grubić i Adamović (2003.) navode da su glikohidrati osnovni izvor energije u obrocima za preživače. Oni čine između 50 i 80% suhe tvari biljnih krmiva. Postoje tri osnovne podjele ugljikohidrata:

1. Jednostavni šećeri.
2. Rezervni ugljikohidrati, koji se još nazivaju i nestrukturani.
3. Strukturni ili vlaknasti ugljikohidrati.

Jednostavni šećeri (npr. glukoza, fruktoza i sl.) su produkti fotosinteze biljaka. Ovi jednostavni šećeri su topivi u vodi, što ih čini lako dostupnim izvorom energije. Njihova fermentacija u buragu je potpuna, a rezultat ovih procesa su niže masne kiseline (NMK).

Škrob je najrasprostranjeniji rezervni ugljikohidrat. On se nalazi u zrnju žitarica i u nekim drugim krmivima, poput krumpira. Kukuruzni škrob je znatno otporniji na razgradnju u buragu nego škrob iz drugih žitarica. Ukoliko u obroku nije zastupljena prevelika količina škroba, on se gotovo u potpunosti razgrađuje u buragu. Razgrađuje se od 60 do 100% škroba, što ovisi o brzini prolaska hrane kroz probavni trakt životinje. Škrob koji izbjegne razgradnju u buragu, može se razgraditi u tankom crijevu, pri čemu se stvorena glukoza apsorbira kroz stjenku tankog crijeva. Kod škroba stvorenog u crijevima ne javljaju se veliki gubici u obliku toplote koji su povezani sa fermentacijom u buragu. Međutim, treba voditi računa da se u buragu osigura dovoljna količina jednostavnih šećera razgradivih u vodi koji predstavljaju izvor energije neophodan za razvoj mikroorganizama (Grubić i Adamović, 2003.).



Slika 1. Škrob. Izvor: <https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%A0krob> – pristup 3.2.2021.

### **2.1.2 Energija**

Energija u hrani za životinje najčešće se mjeri u mega džulima po kilogramu suhe tvari (MJ/kg/ST). Energija dostupna organizmu za metabolizam, skladištenje ili proizvodnju topline, zove se metabolička energija (ME). Efikasnost korištenja metaboličke energije bazirana je na fiziološkim funkcijama poput održavanja, rasta i laktacije.

Neto energija (NE) uzima u obzir efikasnost upotrebe metaboličke energije za pojedine procese, pa se tako koriste NEm za potrebe održavanja (eng. Maintenance), NEg za prirast (eng. Gain) i NEL za laktaciju (eng. Lactation). Ovaj je sistem teži za korištenje u programskim modelima, ali pomoću njega, jasnije se mogu uspoređivati energetske vrijednosti različite voluminozne krme i različitih koncentrata koji se daju domaćim životinjama (Grubić i Adamović, 2003.).

### **2.1.3 Masti**

Koncentracija masti u obroku krava obično je vrlo niska, oko 2,5% suhe tvari. U obrok se mogu dodati masti kako bi se dobila konačna količina od 6% ST. U hranidbi preživača, dodane masti mogu doprinijeti neželjenim metaboličkim poremećajima, kao i negativno utjecati na mikrobnu populaciju buraga. Najveća je prednost dodavanja masti u obrok mliječnih krava da se tako može povećati energetska vrijednost obroka, bez povećanja količine nevlaknastih ugljikohidrata u obroku.

Mast se može dodati obroku putem biljnih ulja ili kao dehidrirana životinjska mast. Također postoje i pripravci koju su burag inertni, dakle nemaju interakcija sa mikroorganizmima buraga. Masti koje se dodaju u obrok su uglavnom nesaturirane, te se proces saturacije odvija u buragu. Ako je u obroku previše masti, nusprodukti saturacije masti mogu proći kroz burag te se apsorbirati u probavnom traktu. Ovi nusprodukti uključuju i trans masne kiseline, koje direktno suzbijaju lučenje mliječne masti. Mast se može dodati u obrok u količini do 400g. Sjemenke uljarica su bolji način dodavanja masti od čistog ulja. Ako se koristi rumen inertne masnoće, može se dodati daljnjih 200 - 400g, ali njegov udio ne smije prijeći 6,5% masti u suhoj tvari obroka (Grubić i Adamović, 2003.).

Krava čija proizvodnja mlijeka korigiranog na 4% mliječne masti prelazi 30kg na dan teško može konzumirati dovoljno hrane za zadovoljavanje energetske potrebe, zbog čega se pribjegava dodavanju masnijih krmiva u obrok. Starije krave obično bolje reagiraju na dodavanje masti od mlađih. Ukupna mast ne treba prelaziti 7,5% suhe tvari u obroku. Dodavanje većih količina masti obrocima krava može dovesti do problema, poput depresivnog utjecaja nezasićenih masnih kiselina na razvoj celulitičkih mikroorganizama, a time i razgradnju celuloze, odnosno sintezu mliječne masti, a ukoliko u obroku ima više od 5% masti, obrok postaje lako kvarljiv i štetan za životinje (Jovanović i sur., 1993.). Hranidba krava krmivima bogatim kratkolančanim nezasićenim masnim kiselinama povećava količinu masti u mlijeku, a hranidba bogata nezasićenim masnim kiselinama ju smanjuje (Grbeša i Samaržija, 1994.). Jenkins (2002.) navodi da su zaštićene masti one masti koje su na neki način zaštićene od razgradnje u buragu, pa nemaju štetnih utjecaja na mikroorganizme buraga. Mnoge zaštićene masti se nalaze u zaštitnoj kapsuli, poput proteina tretiranih formaldehidom, koja štiti masti od razgradnje u buragu. Masti u ovom obliku mogu se davati visokoproizvodnim mliječnim kravama ili kao dodatni izvor energije ljeti, kad je konzumacija hrane manja.

#### **2.1.4 Proteini**

Zahtjevi sa proteinima kod mliječnih krava vrlo su visoki u odnosu na druge kategorije goveda, jer koriste puno dušičnih spojeva za sintezu proteina mlijeka.

Anaerobna razgradnja proteina u buragu ima dvije faze: hidrolizu peptidnih veza putem proteaza i peptidaza i dekarboksilaciju i/ili deaminaciju aminokiselina. Rezultati prve faze su peptidi i aminokiseline. Krajnji produkti druge faze su masne kiseline  $\text{CO}_2$  i  $\text{NH}_3$ . Deaminacija je najvažniji put razgradnje aminokiselina. Smatra se da su za mikroorganizme buraga uz amonijak, peptidi najvažniji krajnji produkt razgradnje proteina, odnosno izvor dušika. Prema kriteriju razgradnje u buragu ukupni protein (UP) u krmivima za preživače može se podijeliti u dvije grupe ili frakcije: 1. razgradivi (RP) i 2. nerazgradivi (NP). Razgradnja je regulirana udjelom nerazgradivog u ukupnom proteinu, brzinom razgradnje i brzinom prolaska sadržaja kroz burag. Promjena u razgradnji proteina može se postići bilo promjenom u udjelu NP i UP obroka, ili izmjenom odnosa brzine razgradnje i brzine protoka kroz burag. Najvažnije pri formuliranju obroka za preživače, kada je

riječ o proteinima, je poznavanje odnosa RP/NP koji je neophodan da bi se osigurala željena proizvodnja, odnosno: 1) aminokiseline koje ne mogu da se sintetiziraju u organizmu 7 (esencijalne), 2) dušične tvari za sintezu aminokiselina koje se mogu sintetizirati u organizmu (neesencijalne), 3) aminokiseline potrebne za glukoneogenezu (Grubić i Adamović, 2003.).

Sirovi protein podrazumijeva samo ukupnu količinu proteina u obroku i protein jednak neproteinskim izvorima dušika. Sirovi protein se računa od izmjerene količine dušika i pretpostavke da u proteinu ima 16% dušika. Ovaj je sustav jednostavan i koristi se kao generalna smjernica za proteinske potrebe preživača. Budući da mikroorganizmi buraga u značajnoj mjeri mijenjaju strukturu proteina odnosno aminokiselina, u hranidbi mliječnih krava u značajnoj se mjeri koriste "zaštićeni" (eng. Bypass) proteini. Također, kako navode Ivanković i Mijić (2020.), vrijednost proteina u hranidbi mliječnih krava izražava se u količini u tankom crijevu iskoristivih sirovih proteina (nSP).

## **2.2 Značaj voluminoze u hranidbi mliječnih krava**

Suvremena proizvodnja mlijeka temelji se na preživačima, biljojedima, koji većim dijelom (50 – 80%) podmiruju potrebe za hranom iz voluminoznih krmiva, svježe zelenih, ali i konzerviranih. Specifična hranjiva vrijednost koja ih opisuje (umjerena energetska vrijednost, izražena voluminoznost s visokim sadržajem vode, lignina, celuloze, hemiceluloze) razlog su što udio voluminozne krme varira ovisno o potrebama mliječnih krava tijekom pojedinoga razdoblja proizvodnog ciklusa. Te specifičnosti hranidbe goveda pretpostavljaju potrebu za dostatnim oraničnim ili pašnjačkim površinama. U specijaliziranoj proizvodnji mlijeka stručno je prihvatljivo predvidjeti 1 hektar po grlu, pri čemu gospodarstvo proizvodi dostatne količine kvalitetne, a jeftine voluminozne krme iz vlastite proizvodnje. Pozitivan je učinak tog koncepta govedarske proizvodnje istodobno u pravilno održavanom plodoredu te u ekološki prihvatljivome načinu uklanjanja stajnjaka. Voluminozna krmiva mliječnim su kravama svakodnevno nužna za normalnu fiziološku funkciju buraga. Mogućnost da se voluminozna krmiva upotrebljavaju u značajnome udjelu nameće potrebu njihove visoke kvalitete, jer o tim krmivima ovisi i konzumacija ukupnoga obroka. S obzirom na količinski udio tih krmiva u obroku i njihovu konkurentnu cijenu, o tim



krmivima ovisi i ekonomičnost proizvodnje mlijeka. Kako preživači trebaju kontinuiranu opskrbu sirovom vlakninom iz voluminoznih krmiva, u razdoblju mirovanja vegetacije dio svježih voluminoznih krmiva se konzervira (Domančinović i sur., 2019.).

Voluminoza služi kao sastavnica osnovnoga obroka. Nekada zastupljeniji način konzerviranja sušenjem (sijeno) danas se zamjenjuje novijim tehnološkim rješenjem siliranja (silaža, sjenaža). Metodom siliranja postiže se dobra ješnost, a zbog zadržavanja strukture svježeg krmiva i hranjive vrijednosti, poveća se i sinteza mlijeka. Mjereno u količini proizvedenoga mlijeka po jedinici oranične površine, svježe konzervirane krmne kulture postižu najveći proizvodni rezultat. Kada se govori o svježim zelenim voluminoznim krmivima u hranidbi mliječnih goveda, misli se na nadzemni vegetativni dio biljke (stabljika i list) različitoga botaničkog podrijetla. Zelena krma heterogenoga botaničkog sastava može se proizvesti na prirodnim i kultiviranim pašnjacima, dok se brojne kultivirane krmne kulture proizvode na oraničnim površinama, a tada se preporučuje planski organizirati proizvodnju više krmnih kultura tijekom cijele godine (tzv. “zeleni krmni slijed”).

Sijeno je konzervirano suho voluminozno krmivo nastalo sušenjem zelenih svježih voluminoznih krmiva do skladišno stabilne vlažnosti od 14%. Košnjom nadzemnih, vegetativnih dijelova prestaje kontakt stabljike i lista s korijenom, koji je izvor vode i mineralnih tvari, zbog čega prestaje život stanice, pa se biljka suši. Sijeno se, kao najstariji način konzerviranja krmiva, proizvodi zbog kontinuirane potrebe preživača za voluminoznim krmivima u obroku. S obzirom na tehnologiju konzerviranja, sijeno se uobičajeno priprema od jednogodišnjih trava, strnih žitarica, djetelinsko travnih smjesa i od višegodišnjih leguminoza (lucerna i crvena djetelina). Od svih biljnih vrsta od kojih se sijeno sprema, sijeno leguminoza ima prioritet u prinosu po jedinici površine, ali i zbog svoje hranjive vrijednosti. Postupak sušenja sijena prirodnim putem traje više dana (2 – 6), što je izravno povezano i s određenim gubitcima hranjivih tvari. Radi prevencije većih gubitka hranjive vrijednosti, zelene mase tijekom postupka sušenja potrebno je izbjegavati loše vremenske prilike (kišu) u vrijeme pripreme sijena, košnju i prve sate sušenja planirati u vrijeme najvećega intenziteta sunčeve energije, u dopodnevnim satima, djelomično prosušenu zelenu masu okretati te skupljati i balirati u ranim jutarnjim i kasnim popodnevnim satima, kada

povećana vlaga zraka povoljno utječe na očuvanje lista na stabljici, zbog povećane elastičnosti stabljike i lista.

List u sijenu lucerke čini i do 50% udjela biljke, a sadrži 75% ukupnih proteina i čak do 90%  $\beta$ -karotena. Sijeno treba spremati u sjenike pri vlažnosti manjoj od 15%. Ako se ne prihvate ponuđene preporuke tijekom sušenja zelenih krmiva, neizbježni su gubitci hranjivih tvari koji mogu iznositi i do 40%, a takvo je sijeno i zdravstveno neispravno kao hrana životinjama, zbog čega ga i nerado jedu. Dobro sijeno krava konzumira od 7 do 10 kg/d, a loše tek do 2 kg (Domančinović i sur., 2019.).

Silaža je zelena voluminozna krma različitog botaničkog podrijetla, konzervirana spontanom mliječno-kiselim vrenjem, pri čemu mliječno-kisele bakterije u anaerobnim uvjetima iskorištavaju vodotopljive šećere biljke kao hranu, koje metaboliziraju u mliječnu kiselinu koja djeluje kao konzervans. U nas i u svijetu najčešće se silira kukuruz kao cijela biljka, samo zrno i zrno s klipom. Hranjiva vrijednost silaže cijele biljke kukuruza najbolja je kada udio klipa prelazi 500 g/kg silaže. Nešto se rjeđe pripremaju silaže od vodenastih i sočnih krmiva. Silaže se mogu pripremati od dvaju ili više krmiva, tzv. miješane – “sendvič” silaže. Te su miješane silaže osobito prihvatljivo rješenje ne samo zbog pravilnijega upotunjivanja hranjive vrijednosti dvaju krmiva u istoj, miješanoj silaži, nego se na taj način omogućuje siliranje i onih krmiva koja se sama ne mogu silirati zbog nedostatka šećera ili velike količine ST. Da bi se neko krmivo moglo konzervirati mliječno-kiselim vrenjem, mora ispunjavati i određene preduvjete siliranja, a pri tome se misli na sljedeće: šećerni minimum, anaerobni uvjeti, puferni kapacitet, vlagu i temperaturu (Domančinović i sur., 2019.).

Šećerni minimum potrebna je količina u vodi topivih ugljikohidrata (glukoze i dr.) u odnosu na količinu ST-a biljke koja se želi silirati, a ona mora biti oko 6 – 9% u ST-a. Monosaharid glukoza nužna je kao hrana mliječno-kiselim bakterijama koje od nje stvaraju poželjnu mliječnu kiselinu u siliranome krmivu. Biljke koje nemaju potrebnu količinu šećera onemogućuju potrebnu aktivnost bakterija i željeni intenzitet zakiseljavanja mase te proces fermentacije skrene u neželjenome smjeru (kvarenje), jer počnu dominirati vrste koje ne proizvode mliječnu kiselinu. Zbog nedovoljne količine šećera neke se biljne vrste otežano siliraju, a neke se ne mogu silirati. Kod

nekih krmnih kultura (višegodišnje leguminoze), osim granične koncentracije šećera, proces zakiseljavanja otežavaju i pojačane količine pufernih tvari, a to su proteini, voda i mineralne tvari. Siliranje se provodi u anaerobnim uvjetima, dakle bez prisutnosti kisika, u kojim je moguće razmnožavanje i djelovanje korisnih bakterija mliječno-kiselinskog vrenja. Masa koja se s polja dovozi u silos u rastresitome je stanju, sadržava značajnu količinu kisika. U silosu se gaženjem siliranoga materijala težim traktorima tijekom određenoga vremena postiže sabijanje mase uz istiskivanje kisika. Anaerobne uvjete treba stvoriti što prije jer se time preveniraju jače izraženi procesi oksidacije (gubitci hranjivih tvari) i razvoj drugih nepoželjnih mikroorganizama (Domančinović i sur., 2019.).

Poželjna pH vrijednost treći je uvjet, koji se postiže kada se uz dostatnu količinu šećera u anaerobnoj sredini razvijaju mliječno-kisele bakterije te, stvarajući mliječnu kiselinu, zakiseljavaju siliranu masu do pH 3,8 – 4,2. Niži pH nije poželjan jer životinje nerado konzumiraju prekiselu silažu, a pri slabijem zakiseljavanju postoji mogućnost naknadnoga razvoja nepoželjnih štetnih mikroorganizama i uzročnika kvarenja. Vlažnost siliranoga materijala važan je uvjet za dobru aktivnost mliječno-kiselinskih bakterija, za kvalitetno i potpuno sabijanje silaže i postizanje anaerobnih uvjeta. Optimalna je vlažnost voluminoznih silaža (cijele biljke kukuruza, lucerke, DTS-a) 65 – 70 %, a kod koncentriranih silaža (zrno kukuruza i drugih žitarica) vlažnost je 30 – 35 %. Pre suha silirana masa teško se sabija te ostaje zrak, koji pogoduje razvoju nepoželjnih mikroorganizama. Ni previše vlažna silaža (> 75 % vode) nije poželjna, jer su gubitci staničnoga sadržaja povećani, a pojačana je aktivnost bakterija octenoga vrenja. Temperatura u siliranoj masi mora biti 20 – 35 °C (optimalna 25 °C) i ona pokazuje ide li proces fermentacije željenim tijekom. Pri tim temperaturama, aktivnost poželjnih MK bakterija najveća je i zakiseljavanje je najbrže. Silirani se materijal u prvim satima siliranja može zagrijati u dopuštenim granicama, a zagrijavanje nastaje kao rezultat fermentacije, pri čemu se razgradnjom organskih tvari stvara toplina. Ako je nabijanje mase brzo i potpuno, tada se kisik istisne iz mase i onemogućiti oksidacijom prekomjerno povećanje topline. Povećana temperatura dovodi do promjene boje silaže, smanjuje se hranjiva vrijednost, a umanjuje se i ješnost takve silaže. Kako bi se proizvela kvalitetna silaža, nužna je pravilna primjena niza tehničko- tehnoloških postupaka, od skidanja

siliranoga materijala s polja do posluživanja silaže u hranidbi životinja (Domančinović i sur., 2019.).



Slika 2. Horizontalni silos za silažu.

Izvor: [aurora-invest.hr](http://aurora-invest.hr) – pristup 3.2.2021.

Spremanje silaže podrazumijeva dostatnu radnu snagu i kvalitetna tehnička sredstva kako bi silirana masa u što kraćem vremenu bila dopremljena u silos, nabijena i zatvorena. Uz pretpostavku da je silos kvalitetno očišćen, za kvalitetu silaže i siliranja potrebno je pripremiti silokombajn s oštrim noževima, koji tada jednolično usitnjavaju masu. U trenutku skidanja siliranoga materijala važno je pravilno procijeniti optimalnu fenofazu rasta, što pridonosi usklađenosti prinosa i poželjnog omjeru hranjivih tvari po jedinici površine. Pri košnji krmiva za siliranje mora se pravilo postaviti visinu reza biljke, koja mora biti na 20 – 30 cm od zemlje. Nižim rezom povećava se količina mase, ali je probavljivost smanjena, a i povećana je mogućnost zaprljanja donjih dijelova biljke nepoželjnim mikroorganizmima (klostridije, plijesni, mikotoksini) iz tla. Manja će probavljivost izazvati smanjenu konzumaciju te silaže, a veća onečišćenja mogu dovesti do nepravilnoga procesa fermentacije i do probavnih smetnji životinja pri konzumiranju te silaže. Nakon transportiranja mase u silos, ona se ravnomjerno raspoređuje po cijelome silosu u debljini od oko 20 cm i potom kvalitetno nabije. Pouzdan je indikator pravilnoga nabijanja i potpunoga istiskivanja zraka temperatura silirane mase, koja ne smije biti jače povećana (više od 30 °C). Napunjeni silos mora se kvalitetno pokriti kako bi se spriječio prodor zraka i oborina, koje mogu naknadno izazvati kvarenje silaže. Pod kvalitetnim se pokrivanjem misli na plastičnu foliju koja se odozgo opterećuje predmetima poput vreće s pijeskom, zemljom, starim gumama,

balama slame i sl., a maseno opterećenje po m<sup>2</sup> mora biti 80 – 100 kg. Nepokriveni i nepravilno pokriveni silosi povećavaju gubitke (i do 20% u horizontalnom silosu), a to znači da je svaki peti hektar proizvedene silaže na polju izgubljen u silosu (Domančinović i sur., 2019.).

Uspoređujući sijeno i silažu, sjenaža je način konzerviranja djelomično prosušenih svježih voluminoznih krmiva (trave, višegodišnje i jednogodišnje leguminoze, travno-djetelinske smjese). Prosušivanjem krme za sjenažu postiže se poželjna vlažnost 40 – 60 %. Različite biljne kulture, s obzirom na hranjivu vrijednost, pri pripremi sjenaže potrebno je različitim intenzitetom prosušivati. Crvena djetelina s malo šećera i značajnom količinom pufernih tvari (proteina) prosušuje se jače, lucerka nešto manje, a travne kulture najmanje. Optimalna vlažnost u krmivu važna je s jedne strane zbog odvijanja poželjnih procesa anaerobne fermentacije, a s druge strane kvalitetnoga nabijanja i stvaranja anaerobnoga stanja u krmivu od kojega se proizvodi sjenaža. Anaerobno stanje materijala u silosu poželjno je što prije postići, i to gaženjem traktorom po raspoređenoj masi krmiva u balama u debljini sloja do 30 cm (Domančinović i sur., 2019.).

Tijekom pripreme sjenaže anaerobnim uvjetima osigurava se aktivnost poželjnim mliječno-kiselim bakterijama, koje, koristeći se vodotopljivim ugljikohidratima, stvaraju mliječnu kiselinu. Mliječna kiselina u sjenaži djeluje bakteriostatski i baktericidno te onemogućuje razvoj nepoželjnih mikroorganizama (plijesni). Zbog veće količine suhe tvari u sjenaži (u odnosu na silažu) procesi fermentacije manjeg su intenziteta, a otuda je i pH-vrijednost sjenaže veća. Za potrebu procesa fermentacije potrebna je određena količina vodotopljivih šećera (6 – 9 % u ST) u biljnoj stanici, a oni se ubrzano sintetiziraju u prvim jutarnjim satima. To znači da se biljni materijal mora kositi u kasnijim dopodnevnim satima kako bi se tijekom idućih 5 – 6 sati masa prosušila, a potom spremila u silos, silovreće ili bale.

Prilikom baliranja sjenaže poželjno je da preše imaju noževe kojima se masa reže na dužinu 6 cm. Nakon što se u preši formira bala, omata se mrežom, a potom troslojno strech folijom koja osigurava anaerobne uvjete u materijalu. Osim pravilno obavljenoga postupka konzerviranja krmiva do sjenaže, za visoku vrijednost sjenaže vrlo je važno pokositi krmivo u optimalnoj fenofazi rasta, a to je kod višegodišnjih leguminoza početak cvjetanja (15 – 20 % cvijeta), dok je za trave optimalno vrijeme košnje u ranom stadiju vlatanja. Optimalan trenutak

skidanja krmiva daje najbolji odnos između količine i kvalitete krmiva s obzirom na to da kasnijom košnjom opada količina proteina, a raste udio celuloze i lignina, zbog čega se smanjuje probavljivost organske tvari. Kako bi postupak provenjavanja bio jednoličan i brz, istodobno s košnjom mora se gnječiti masu, a otkos rasporediti po cijeloj površini (Domančinović i sur., 2019.).

Drugo je rješenje za bolje provenjavanje primjena organskih desikanata (propionska i mravlja kiselina). Ti preparati na osnovi organskih kiselina zaustavljaju život stanice i prouzročuju sušenje bez promjene hranjive kvalitete tretiranoga krmiva. Osim toga, desikanti imaju i biostatski učinak na mikroorganizme te preveniraju kvarenje sjenaže. Kvalitetu sjenaže uvelike određuje visina reza, pa se kod višegodišnjih leguminoza preporučuje visina košnje 6 – 8 cm. Na taj se način manje oštećuje vegetativni vrh i brži je porast nove mase, a s druge strane izbjegava se donji dio biljke, koji je obično jače onečišćen. Taj donji dio stabljike sadržava i veću koncentraciju lignina, koja smanjuje probavljivost i hranjivu vrijednost gotove sjenaže (Domančinović i sur., 2019.).



Slika 3. Sjenaža u rolo balama. Izvor: burza.com.hr – pristup 2.3.2021.

## 2.3 Hranidba po proizvodnim fazama

### 2.3.1 Suhostaj

Suhostaj se dijeli na dvije faze: rani suhostaj (eng. Far off), koji traje od 60og do 21og dana prije teljenja i kasni suhostaj (eng. Close up), od 21og dana prije teljenja, do partusa (Mazon, 2010.). Cilj hranidbe krava u suhostaju je rast i razvoj plodai priprema za sljedeću laktaciju. Dnevna konzumacija ovisi o veličini krave, stadiju laktacije, količini proizvedenog mlijeka i dobi krave. Krave s višom proizvodnjom, starije krave i teže krave jedu više suhe tvari i jedu brže. Zimi krave jedu više nego ljeti (Domaćinović i sur., 2008.). Greške u hranidbi mliječnih krava najčešće je prekasno korigirati kada započne laktacija, pa je hranidba tijekom suhostaja poseban izazov uzgajivača. Pravilna hranidba u suhostaju nužna je da bi krava održavala visok unos hrane, zdravlje, produktivne sposobnosti i optimalnu proizvodnju mlijeka kada laktacija počne. (Van Saun, 1991.). Poželjan odnos kalcija : fosfora trebao bi biti 1,5:1 (Domaćinović i sur., 2008.). Pred kraj suhostaja potrebno je malo smanjiti unos kalcija, kako krave ne bi dobile parezu.

Uz voluminozna krmiva dobre kvalitete, potrebe životinje za žitaricama tijekom suhostaja su minimalne. Ipak, treba ih dodati u obrok kako bi se održavala mikrobna populacija buraga. Pri sastavljanju obroka, bitno je provjeriti kvalitetu voluminoznih krmiva kako bi se mješavinom žitarica nadoknadile one tvari koje nedostaju. Prevelika količina žitarica može dovesti do metaboličkih poremećaja (Forenbacher, 1975.).

### 2.3.2 Rana laktacija

Rana laktacija je period koji traje prvih 10 tjedana (60-70 dana) laktacije. Proizvodnja mlijeka se brzo povećava i dostiže maksimum sa 6-8 tjedana poslije teljenja. Količina konzumiranja hrane, posebno energije, u tom periodu ne prati potrebe za proizvodnju mlijeka. Krava se nalazi u negativnoj energetskej bilanci, tako da se mobiliziraju njene tjelesne rezerve (masno tkivo) za proizvodnju mlijeka. Povećanjem količine koncentrata za 0,5-1 kg svakog dana poslije teljenja postepeno se povećava unošenje hranjivih tvari u organizam. Treba izbjegavati da količina koncentrata prijeđe 60% suhe tvari obroka, jer može dovesti do acidoze, poremećaja u preživljanju i smanjene mliječne masti u mlijeku. Posebnu pažnju treba obratiti na zastupljenost vlakana, jer ona osiguravaju normalno funkcioniranje buraga. Također, važan je i udio pojedinih frakcija proteina. Davanje ukupnih proteina na nivou potreba, ili čak nešto iznad toga, stimuliraju konzumiranje suhe tvari obroka i omogućuje uspješno iskorištavanje tjelesnih rezervi za stvaranje mlijeka. Smatra se da je najbolje da krava maksimalnu proizvodnju dostigne između 8-10 tjedna laktacije iako se ističe da ju treba postići što prije. Konzumiranje hrane u periodu poslije teljenja je smanjeno. Maksimum konzumacije se postiže tek nekoliko tjedana (2-4) poslije postignutog maksimuma u proizvodnji mlijeka. Znatna dio rezervnih masti organizam krava koristi za zadovoljavanje deficita u energiji. Gubitak tjelesne mase od 1kg osigurava dovoljno energije za oko 6 do 7 kg mlijeka, a proteina za 3 do 4 kg. Prvih dana poslije teljenja krave trebaju dobivati isti obrok kao i prije teljenja. Tijekom prvih 10-15 dana obrok se sve više povećava i uvode nova krmiva. Prvih nekoliko dana daje se najkvalitetnije sijeno i silaža, kao i mala količina koncentrata (ispod 3,5 kg). Potom se uvode i ostala krmiva, a količina koncentrata se povećava 0,5-1 kg na dan dok se ne postigne željena količina koncentrata. Nedostizanje maksimuma proizvodnje, kao i pojava ketoze, predstavljaju probleme koji su najčešće javljaju u ovom periodu i posljedice su nepravilne hranidbe prije i poslije teljenja. Što je niži maksimum proizvodnje u ovom dijelu laktacije reflektirati će se na cjelokupnu proizvodnju u laktaciji (Grubić i Adamović, 2003.).



### 2.3.3 Vrhunac laktacije

Ovaj period obuhvaća drugih 10 tjedana (70- 140 dana) poslije teljenja. Krave treba držati na vrhuncu proizvodnje koliko god dugo je to moguće. Konzumiranje hrane se u tom periodu približava maksimumu. U tom periodu krave više ne gube tjelesnu masu – ili je održavaju konstantnu ili je donekle povećavaju. Kod grla koja su adekvatno hranjena, postiže se da brzina smanjenja mliječnosti nakon dostizanja maksimuma proizvodnje mlijeka bude sporija. Ovo je period u kojemu hranidba najdirektnije utječe na proizvodnju. Od sastava obroka direktno zavisi količina dobivenog mlijeka. Što je veća proizvodnja mlijeka, to koncentracija energije i proteina u obroku mora biti veća. Količina ST iz koncentrata u obroku u ovom periodu dostiže maksimum – može iznositi najviše 2,3% tjelesne mase krave. U ovom periodu i dalje treba koristiti kvalitetnu voluminoznu hranu. Konzumiranje ST treba biti minimalno 1,5% tjelesne mase kako bi se očuvale sve funkcije buraga i održao postotak mliječne masti. Potencijalni problemi koji nastaju tokom ovog perioda mogu biti: nagli pad proizvodnje mlijeka, pad postotka mliječne masti, tihi estrus i ketoza. Krajem prve ili u toku druge faze laktacije obično se vrši oplodnja krave. To se događa najčešće između 40. i 90. dana laktacije, odnosno poslije dostizanja maksimuma u proizvodnji mlijeka. Kako u to vrijeme krave dobivaju značajne količine hranjivih tvari nema posebne potrebe, a ni mogućnosti, da se obrok poveća radi uspješnije oplodnje (Grubić i Adamović, 2003.).

### 2.3.4 Sredina i kraj laktacije

U ovoj fazi, hranidba krava je relativno je jednostavna. Proizvodnja mlijeka pada (brzinom od 8 do 10% mjesečno) i zadovoljavanje potreba krava za hranom nije teško. Količina koncentrata treba biti na razini koja odgovara proizvodnji mlijeka uz to što se u ovom periodu nadoknađuje gubitak tjelesne mase sa početka laktacije. Pred kraj laktacije pada proizvodnja mlijeka a povećava se efikasnost iskorištavanja hranjivih tvari. Zbog toga je kraj laktacije optimalan period za oporavak kondicije kod krava. Prema Van Soestu (1982.), efikasnost i iskoristivost energije za proizvodnju mlijeka je 62% iz hrane, a 82% iz masnog tkiva. Za stvaranje masnog tkiva, efikasnost iskorištavanja energije je 75% u laktaciji a 59% u suhostaju. Zbog ovoga je najbolje da krava stvara tjelesne rezerve dok je još u laktaciji. Zasušena grla sa prevelikom količinom tjelesne masti nose u sebi potencijalnu mogućnost za pojavu ozbiljnih metaboličkih poremećaja. Sindrom debele krave dovodi do nagomilavanja pretjerane količine masti u trbušnoj šupljini, jetri, bubrezima, opadanja apetita i smanjenje opće otpornosti krava na infekcije (Grubić i Adamović, 2003.).

## 2.4 Primjena optimizacije u hranidbi krava

Balansiranje obroka za mliječne krave je relativno složen postupak čak i kada nema ograničenja po pitanju cijene, a minimiziranje cijene koštanja dodatno komplicira ovaj postupak. Obroke s minimalnom cijenom koštanja moguće je formulirati „ručno“ korištenjem „simpleks“ metode, ali znatno teže i sporije u odnosu na uporabu računala i specijaliziranih programskih rješenja. Parametri za formuliranje obroka sa minimalnom cijenom koštanja su:

- kemijski sastav i energetska vrijednost krmiva.
- cijena krmiva.
- ograničenja za hranjive tvari.
- ograničenja za krmiva (udio u obroku).

Prva upotreba računala u formulaciji obroka zabilježena polovinom 20. stoljeća (Waugh, 1951.), a prva objavljena knjiga na tu temu pod nazivom „Linearno programiranje i hranidba životinja“ je objavljena 1967. godine (Dent i Casey, 1967.). Masovnija upotreba računala u formulaciji obroka započinje u 1980-ima kada su osobna računala postala komercijalno dostupna (Suresh, 2016). U današnje doba, formulacija hrane bez upotrebe računala je vrlo rijetka i gotovo nezamisliva. Patil i sur. (2015.) u svom preglednom radu su opisali različita programska rješenja za formulaciju obroka domaćih životinja.

Do sada je ovu problematiku izučavao veći broj znanstvenika, koristeći razne pristupe. Na primjer, na tržištu je dostupan programski paket „Panonmix“ koji koristi matricno računanje za sastavljanje smjesa, premiksa i obroka. Koristi se za planiranje obroka za sve vrste preživača i konja. Ima veliku bazu krmiva sa detaljno opisanim kemijskim sastavom i unaprijed definiranim ograničenjima (PanonMix, 2013.).

Saxena (2017.) je napisala program čiji je cilj izračunati količinu krmiva u obroku za hranidbu životinja s optimalnim kemijskim sastavom za najbolju mliječnost, uzimajući u obzir minimalnu cijenu koštanja i druge parametre. Različiti sastojci obroka kombinirani su tako da će obrok osigurati energiju i sve potrebne hranjive tvari za različite faze proizvodnje.

Sastavljanje obroka za životinje vrlo je kompleksan proces. Linearno programiranje kao metoda ima neka ograničenja, poput mogućnosti optimizacije samo jedne funkcije ili krutosti ograničenja, međutim te je poteškoće moguće prebroditi koristeći naprednije pristupe. Programiranje cilja (eng. Goal programming) koristi se kao nadopuna linearnom programiranju, kako bi se moglo učinkovito koristiti više od jedne funkcije cilja. Saxena (2017.) je razvila algoritam za sastavljanje obroka za mliječne krave za različite faze proizvodnje, a osim minimizacije cijene, uvodi i varijablu maksimizacije roka trajanja obroka. Također, ovaj algoritam uzima u obzir varijabilnost kemijskog sastava određenog krmiva iste vrste, što drugi algoritmi ne uračunavaju.

Moraes i sur. (2012.) napravili su linearni program za hranidbu mliječnih krava, koji osim minimizacije cijene obroka, ima i ograničenje za proizvodnju stakleničkih plinova, s idejom da se sastavi model za organizaciju obroka ukoliko su prisutni propisi za smanjenje emisije stakleničkih plinova. Sastavili su dva modela, prema mogućim modelima propisa. Jedan dodatno kažnjava emisiju stakleničkih plinova iznad nekog praga, a drugi ograničava stvaranje stakleničkih plinova na zadane vrijednosti. Kod kažnjavanja dodatne proizvodnje stakleničkih plinova, nije došlo do statistički značajne promjene cijene između slučajeva kad bi se uvrstilo to ograničenje u odnosu na to kada bi se izračunala samo minimalna cijena koštanja obroka. Međutim, kada se koristio model smanjenja proizvodnje stakleničkih plinova za 5%, 10%, ili 13,5%, od standardnog obroka, cijena koštanja obroka porasla bi za 5%, 19,1% i 48,5%. U slučaju kada bi se ovakvi propisi uveli, ili bi se povećala cijena mlijeka za potrošača, ili bi proizvođač trebao dodatne kompenzacije da ne bankrotira, jer ne bi mogao izdržati takvo povećanje cijene. Uvođenje restrikcija proizvodnje stakleničkih plinova bi u svakom slučaju povećalo potrebu za hranidbom zrnima žitarica.

Nasseri i sur. (2011.) uspoređivali su učinkovitost linearnog programiranja i tzv. „fuzzy“ programiranja u nalaženju najjeftinijeg, kemijski ispravnog obroka za krave u ranoj laktaciji. Takvo programiranje umjesto binarne logike koristi funkciju distribucije pripadnosti nekom skupu, te može optimirati obrok kada se umjesto fiksnih ograničenja kemijskog sastava krmiva koriste dopušteni rasponi. Intuitivno gledano, to znači da rub dozvoljenog geometrijskog područja rješenja nije oštar, već „zamućen“ (engl. fuzzy). Obrok koji je bio formuliran koristeći tzv. „fuzzy“ programiranje bio je 8% jeftiniji od onog formuliranog linearnim modelom. Hossain i sur. (2015.)

navode kako je jedan od ograničavajućih faktora u proizvodnji mlijeka u Bangladešu manjak izbora krmiva. Tamošnji uzgajivači nisu u mogućnosti lako doći do visokokvalitetnih krmiva za proizvodnju mlijeka, pa koriste suboptimalna krmiva koja sadrže manjak mikro i makro elemenata, poput vodenog zumbula (*lat. Eichhornia crassipes*) i Albicije (*lat. Leucaena leucocephala*). Autori su razvili jednostavan program u Microsoft Excelu-u za izračun optimalnog obroka za autohtone vrste mliječnih krava. Ovime su pokazali kako programi za sastavljanje najjeftinijeg, kemijski ispravnog obroka mogu biti od pomoći i uzgajivačima veoma ograničenih mogućnosti.

### 3 Materijali i metode

#### 3.1 Matematički modeli programiranja

Svaka jednadžba sa dvije nepoznanice se može prikazati kao pravac u koordinatnom sustavu, formule  $y=ax+b$ , a sva rješenja te jednadžbe se nalaze na tom pravcu (Čaklović, 2010.).

Ukoliko se neka jednostavna jednadžba pretvori u nejednadžbu, prostor rješenja se nalazi iznad pravca, ukoliko je znak nejednakosti „>“, ili ispod pravca, ukoliko je znak nejednakost „<“. Kada se govori o problemima optimizacije uz ograničenja opisana sustavom nejednadžbi, svaka jednadžba (ili svaki red u matrici ograničenja), ukoliko ima dvije nepoznanice, može se prikazati kao pravac u koordinatnom sustavu, a funkcija cilja se prikazuje kao pravac koji prolazi kroz prostor opisan nejednadžbama (Čaklović, 2010.).

Ukoliko nejednadžbe imaju samo dvije nepoznanice, svaka od nejednadžbi definira po jedan pravac, a oni zajedno ograničavaju prostor dozvoljenih rješenja u obliku nepravilnog mnogokuta. Svakim dodavanjem nepoznanice u sustav nejednadžbi, dodaje se jedna dimenzija u koordinatni sustav. Dakle, ako se raspolaže sa sustavom nejednadžbi sa 3 nepoznanice, više se ne govori o dvodimenzionalnom mnogokutu, već o trodimenzionalnom poliedru ograničenom ravninama, svaku od kojih definira po jedna nejednadžba (Čaklović, 2010.). U ovom radu koristi se sustav nejednadžbi sa 24 nepoznanice. Takav je geometrijski prostor teško zamisliti, zbog čega su računalni programi za linearno programiranje nužni pri rješavanju ovakvih kompleksnih sustava.

U provedbi ovog operacijskog istraživanja korišteni su hranidbeni normativi za za 6 proizvodnih faza mliječnih krava: rani suhostaj, kasni suhostaj, početak laktacije, rana, srednja, i kasna laktacija (Feed composition table 2015; Herdt, 2014.). Rješenja postavljenih optimizacijskog problema su dobivena koristeći paket „LPSolve“ u programskom okruženju R. Funkcija cilja (engl. objective function) je bila cijena koštanja obroka, koja se minimizirala.

## 3.2 Hranidbene potrebe i ograničenja

Herdt (2014.) navodi ograničenja vezana za količinu suhe tvari pojedinih obroka i njihov kemijski sastav. Skup tih podataka najprije se uvrsti u tablicu u Microsoft Excelu. Tablica se uveze u programsko okruženje R. Prvi je korak izgraditi matricu ograničenja u R-u, što je lijeva strana sustava nejednadžbi. Ona je slična tablici podataka koja je uvezena iz Excela, ali ne identična. Potrebno je sve vrijednosti navesti u istim mjernim jedinicama, budući da su mnoge vrijednosti izražene u različitim mjernim jedinicama u tablici potreba, u odnosu na tablicu kemijskog sastava krmiva. Stoga se prvo preračuna energija iz mjerne jedinice Mcal/cwb u MJ/kg. Zatim, potrebno je preračunati sve vrijednosti koje su izražene u postotku suhe tvari u kilograme suhe tvari, kako bi se svi parametri sveli na istu mjeru količine, suhu tvar. Ista transformacija pretvara tržišnu cijenu krmiva u cijenu kilograma suhe tvari, koja se unosi kao cijena u tablicu ograničenja. Ovo će se nakon što se obrok sastavi, ponovno preračunati u stvarnu cijenu koštanja hrane koja se kupuje. Zatim, neki stupci u tablici kemijskog sastava dijelova obroka su suvišni, poput postotka bypass proteina u sirovom proteinu, budući da je količina bypass proteina već fiksirana preko kilograma suhe tvari.

Kad se sve veličine svedu na iste jedinice, i uklone suvišni stupci, matrica ograničenja je spremna za rad. Uvode se i desne strane nejednadžbi, dakle kemijske potrebe za spomenutih 6 proizvodnih faza, kao i dva dodatna ograničenja: da iznos voluminoznog dijela obroka mora biti minimalno 40%, a udio koncentratnog dijela maksimalno 60%. Na ovaj način se dopušta sastaviti obrok i sa više od 40% voluminoznog dijela. Nakon uvođenja desne strane nejednadžbi, izračunava se minimalna cijena koštanja obroka, maksimalna cijena koštanja obroka, kao i udio pojedinih krmiva u svakom obroku.

Rivera (2000.) navodi da soja sadržava enzim ureaze, koji hidrolizira ureu u amonijak. Ako se ovaj proces dogodi u sirovoj hrani, životinjama obrok neće biti primamljiv i odbit će ga konzumirati. Ukoliko je sojinih krmiva u obroku previše, može doći do prebrze razgradnje uree u amonijak u buragu, što može rezultirati trovanjem amonijakom i smrti životinje. Grbeša (2014.) navodi dodatna ograničenja na postotak krepkih krmiva u ukupnom obroku životinje, koja su prikazana u tablici 1. Ova su ograničenja također uzeta u obzir pri optimizaciji.

Tablica 1. Ograničenja količine krepkih krmiva u obroku (Grbeša, 2014.)

Krmivo	Maksimalna količina (%)
Pšenično posije	20
Ječam zrno	50
Kukuruz zrno	40
Pšenica zrno	40
Raž zrno	25
Tritikale zrno	30
Zob zrno	25
Sojina sačma	35
Suncokretova sačma	10
Prženo sojino zrno	15
Suncokretovo sjeme	10
Sušeni rezanci repe	30

Cijene krepkih krmiva dobivene su sa web stranica tvornice stočne hrane „Gašpar“ i iz Prosjeka tjednih cijena za 2018.-tu koje navodi Tržišni cjenovni informacijski centar u poljoprivredi. Cijene voluminozne krme dobivene su prikupljanjem informacija s terena od proizvođača. Cijene voluminoznih krmiva se rijetko objavljuju, jer u većini slučajeva uzgajivači sami proizvode svoju voluminozu. U tablici 2. su prikazani normativi koje navodi Herdt (2014.) za mliječne krave u spomenutih 6 faza proizvodnje. U ovim su normativima kemijski sastojci krmiva izneseni u postotcima od ukupne suhe tvari obroka, što se u programu interno preračunava u kilograme suhe tvari. U tablici 3. prikazana su odabrana krmiva i njihov kemijski sastav.



Tablica 2. Hranidbene potrebe krava mase 650 kg po proizvodnim fazama (Herdt, 2014.).

	Rani Suhostaj	Kasni suhostaj	Početak laktacije	Rana laktacija	Srednja laktacije	Kraj laktacije
Količina mlijeka (kg/dan)			35	55	35	25
Unos suhe tvati (kg/dan)	14	10	15	30	24	20
NEL (MJ/kg)	5,22	5,98	9,288	6,736	6,15	5,69
Sirovi proteini (%)	9,9	12,4	19,5	16,7	15,2	14,1
Bypass proteini (%cp)	2,2	2,8	9,0	6,9	5,5	4,6
ADF (%)	30	25	21	19	21	24
NDF (%)	40	35	30	28	30	32
Ca (%)	0,44	0,48	0,79	0,60	0,61	0,62
P (%)	0,22	0,26	0,42	0,38	0,35	0,32

kg: kilogram; MJ: megadžul; NEL: neto energija za laktaciju; ADF: kisela detergent vlakna; NDF: neutralna detergent vlakna; Ca: kalcij; P: fosfor.

Tablica 3. Kemijski sastav i cijena voluminoznih i koncentriranih krmiva (Feed Composition Table (2015))

Krmivo	ST %	CP %	UIP %	UIPst %	NEL (MJ/ kg)	ADF %	NDF %	Ca %	P %	Cijena (kn)
Sijeno lucerke	89	17	23	3,91	58	36	47	1,4	0,24	0,95
Sijeno crvene djeteline	88	15	28	4,2	55	39	51	1,5	0,25	0,85
Livadno sijeno	88	10	30	3	58	41	63	0,6	0,21	0,6
Silaža pšenice	33	12	21	2,52	59	37	62	0,4	0,28	0,3
Silaža tritikala	34	14	20	2,8	58	39	56	0,58	0,34	0,3
Silaža zobi	35	12	21	2,52	60	39	59	0,34	0,3	0,3
Silaža ječma	35	12	22	2,64	58	37	58	0,46	0,3	0,3
Kukuruzna silaža	34	8	28	2,24	74	27	46	0,28	0,23	0,25
Pšenične posije	90	17	28	4,76	78	10	30	0,1	0,93	0,9
Pšenične pahulje	85	14	29	4,06	95	4	12	0,05	0,39	1
Zrno ječma	89	12	28	3,36	87	7	20	0,06	0,38	1,05
Zrno kukuruza	88	9	58	5,22	91	3	9	0,02	0,3	1,2
Zrno pšenice	89	14	23	3,22	91	4	12	0,05	0,43	1,5

Zrno raži	89	14	29	4,06	83	9	19	0,07	0,55	1,5
Zrno tritikale	89	14	25	3,5	88	5	22	0,07	0,39	0,95
Zrno zobi	89	13	18	2,34	78	15	28	0,05	0,41	0,9
Sojina sačma	90	49	35	17,6	87	10	15	0,36	0,7	4,07
Sačma suncokreta	92	40	27	10,8	66	22	36	0,44	0,97	3,28
Prženo sojino zrno	88	40	48	19,2	97	11	15	0,27	0,64	3,5
Sjemenke suncokreta	90	4	65	2,6	38	63	73	0	0,11	3,5
Sušeni repini rezanci	91	10	44	4,4	78	25	46	5	0,65	12,5
DiCaP	99	22	0	0	0	0	0	22	18,65	3
Vapnenac	98	0	0	0	0	0	0	34	0,02	0,4
mono- dikalcij fosfat	97	0	0	0	0	0	0	16,7	21,1	3,7

ST: suha tvar; CP: sirovi proteini; UIP: proteini nerazgrađeni u buragu; UIPst: proteini nerazgrađeni u buragu u suhoj tvari; NEL: neto energija za laktaciju; ADF: kisela detergent vlakna; NDF: neutralna detergent vlakna; Ca: kalcij; P: fosfor.

### 3.3 Sustav nejednadžbi za obrok u ranom suhostaju

Potrebe za hranjivim tvarima u ranom suhostaju prikazane su u tablici. Sirovi proteini, bypass proteini (UIP), kisela detergent vlakna, neutralna detergent vlakna, kalcij i fosfor preračunati su u kilograme suhe tvari u obroku. Primjerice, prema normativima koje navodi Herdt (2014.), postotak sirovih proteina u obroku je 9,9%, a ukupna konzumacija suhe tvari obroka je 14 kg/ST, dakle sirovih proteina u obroku treba biti 9,9% od 14, što je  $14 \times 0,099 = 1,386$ . Na isti način izračunate su i druge vrijednosti hranjivih tvari u ovom obroku, osim energije, koju Herdt (2014) navodi u megakalorijama po kilogramu, što se preračunalo u megađule po kilogramu. U obroku je potrebna količina voluminoze minimalno 40%, dakle izračuna se 40% od 14, što iznosi 5,6kg. Ukupna količina suhe tvari obroka za rani suhostaj iznosi 14kg. U nastavku se mogu vidjeti nejednadžbe koje su riješene kako bi se izračunao optimalan obrok za rani suhostaj.

Tablica 4. Hranidbene potrebe krava u ranom suhostaju izražene u kg/ST

Hranjive tvari	Količina
SP (kg/ST)	1,386
UIP (kg/ST)	0,308
NEL (MJ/kg)	5,522
ADF (kg/ST)	4,2
NDF( kg/ST)	5,6
Ca (kg/ST)	0,0616
P (kg/ST)	0,0308
Voluminoza (kg/ST)	5,6
Ukupna količina ST (Kg)	14

SP: sirovi proteini; UIP: proteini nerazgrađeni u buragu; NEL: neto energija za laktaciju; ADF: kisela detergent vlakna; NDF: neutralna detergent vlakna; Ca: kalcij; P: fosfor

$$\begin{aligned}
 &0,17x_1 + 0,15x_2 + 0,1x_3 + 0,14x_4 + 0,12x_5 + 0,12x_6 + 0,12x_7 + 0,08x_8 + 0,17x_9 + 0,14x_{10} \\
 &+ 0,12x_{11} + 0,09x_{12} + 0,14x_{13} + 0,14x_{14} + 0,14x_{15} + 0,13x_{16} + 0,49x_{17} + 0,4x_{18} \\
 &+ 0,04x_{19} + 0,1x_{20} + 0,22x_{21} \geq 1,386
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,39x_1 + 0,42x_2 + 0,03x_3 + 0,025x_4 + 0,028x_5 + 0,025x_6 + 0,028x_7 + 0,025x_8 + 0,026x_9 \\
&\quad + 0,022x_{10} + 0,048x_{11} + 0,033x_{12} + 0,05x_{13} + 0,032x_{14} + 0,04x_{15} + 0,035x_{16} \\
&\quad + 0,023x_{17} + 0,17x_{18} + 0,11x_{19} + 0,19x_{20} + 0,026x_{21} + 0,044x_{22} \geq 0,308
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&4,77x_1 + 4,53x_2 + 4,78x_3 + 4,85x_4 + 4,78x_5 + 4,94x_6 + 4,78x_7 + 6,09x_8 + 6,42x_9 + 7,82x_{10} \\
&\quad + 7,16x_{11} + 7,49x_{12} + 7,49x_{13} + 6,83x_{14} + 7,25x_{15} + 6,42x_{16} + 7,17x_{17} + 5,43x_{18} \\
&\quad + 7,98x_{19} + 3,12x_{20} + 6,42x_{21} \geq 5,522
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,36x_1 + 0,39x_2 + 0,41x_3 + 0,37x_4 + 0,39x_5 + 0,39x_6 + 0,37x_7 + 0,27x_8 + 0,1x_9 + 0,04x_{10} \\
&\quad + 0,07x_{11} + 0,03x_{12} + 0,04x_{13} + 0,09x_{14} + 0,05x_{15} + 0,15x_{16} + 0,1x_{17} + 0,22x_{18} \\
&\quad + 0,11x_{19} + 0,63x_{20} + 0,25x_{21} \geq 4,2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,47x_1 + 0,51x_2 + 0,63x_3 + 0,62x_4 + 0,56x_5 + 0,59x_6 + 0,58x_7 + 0,46x_8 + 0,3x_9 + 0,12x_{10} \\
&\quad + 0,2x_{11} + 0,09x_{12} + 0,12x_{13} + 0,19x_{14} + 0,22x_{15} + 0,28x_{16} + 0,15x_{17} + 0,36x_{18} \\
&\quad + 0,15x_{19} + 0,73x_{20} + 0,46x_{21} \geq 5,6
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,014x_1 + 0,015x_2 + 0,006x_3 + 0,004x_4 + 0,0058x_5 + 0,0034x_6 + 0,0046x_7 + 0,0028x_8 + 0,001x_9 \\
&\quad + 0,0005x_{10} + 0,0006x_{11} + 0,0002x_{12} + 0,0005x_{13} + 0,0007x_{14} + 0,0007x_{15} \\
&\quad + 0,0005x_{16} + 0,0036x_{17} + 0,0044x_{18} + 0,0027x_{19} + 0,00x_{20} + 0,05x_{21} + 0,22x_{22} \\
&\quad + 0,34x_{23} + 0,167x_{24} \geq 0,0616
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,0024x_1 + 0,0025x_2 + 0,0021x_3 + 0,0028x_4 + 0,0034x_5 + 0,003x_6 + 0,003x_7 + 0,0023x_8 \\
&\quad + 0,0093x_9 + 0,0039x_{10} + 0,0038x_{11} + 0,003x_{12} + 0,0043x_{13} + 0,0055x_{14} \\
&\quad + 0,0039x_{15} + 0,0041x_{16} + 0,007x_{17} + 0,0097x_{18} + 0,0064x_{19} + 0,0011x_{20} \\
&\quad + 0,0065x_{21} + 0,1865x_{22} + 0,0002x_{23} + 0,211x_{24} \geq 0,0308
\end{aligned}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 \geq 5,6$$

$$\begin{aligned}
&x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} \\
&\quad + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leq 14
\end{aligned}$$

### 3.4 Sustav nejednadžbi za obrok u kasnom suhostaju

Ciljana količina hranjivih tvari i energije u tablici 5. izračunata je na isti način kao i za rani suhostaj, a sustav nejednadžbi riješen je kako bi se ustanovio optimalan obrok.

Tablica 5. Hranidbene potrebe krava u kasnom suhostaju izražene u kg/ST

Hranjive tvari	Količina
SP (kg/ST)	1,24
UIP (kg/ST)	0,28
NEL (MJ/kg)	5,98
ADF (kg/ST)	2,5
NDF (kg/ST)	3,5
Ca (kg/ST)	0,048
P (kg/ST)	0,026
Voluminoza (kg/ST)	4
Ukupna količina ST (Kg)	10

SP: sirovi proteini; UIP: proteini nerazgrađeni u buragu; NEL: neto energija za laktaciju; ADF: kisela detergent vlakna; NDF: neutralna detergent vlakna; Ca: kalcij; P: fosfor

$$0,17x_1 + 0,15x_2 + 0,1x_3 + 0,14x_4 + 0,12x_5 + 0,12x_6 + 0,12x_7 + 0,08x_8 + 0,17x_9 + 0,14x_{10} \\ + 0,12x_{11} + 0,09x_{12} + 0,14x_{13} + 0,14x_{14} + 0,14x_{15} + 0,13x_{16} + 0,49x_{17} + 0,4x_{18} \\ + 0,04x_{19} + 0,1x_{20} + 0,22x_{21} \geq 1,24$$

$$0,39x_1 + 0,42x_2 + 0,03x_3 + 0,025x_4 + 0,028x_5 + 0,025x_6 + 0,028x_7 + 0,025x_8 + 0,026x_9 \\ + 0,022x_{10} + 0,048x_{11} + 0,033x_{12} + 0,05x_{13} + 0,032x_{14} + 0,04x_{15} + 0,035x_{16} \\ + 0,023x_{17} + 0,17x_{18} + 0,11x_{19} + 0,19x_{20} + 0,026x_{21} + 0,044x_{22} \geq 0,28$$

$$\begin{aligned}
&4,77x_1 + 4,53x_2 + 4,78x_3 + 4,85x_4 + 4,78x_5 + 4,94x_6 + 4,78x_7 + 6,09x_8 + 6,42x_9 + 7,82x_{10} \\
&\quad + 7,16x_{11} + 7,49x_{12} + 7,49x_{13} + 6,83x_{14} + 7,25x_{15} + 6,42x_{16} + 7,17x_{17} + 5,43x_{18} \\
&\quad + 7,98x_{19} + 3,12x_{20} + 6,42x_{21} \geq 5,98
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,36x_1 + 0,39x_2 + 0,41x_3 + 0,37x_4 + 0,39x_5 + 0,39x_6 + 0,37x_7 + 0,27x_8 + 0,1x_9 + 0,04x_{10} \\
&\quad + 0,07x_{11} + 0,03x_{12} + 0,04x_{13} + 0,09x_{14} + 0,05x_{15} + 0,15x_{16} + 0,1x_{17} + 0,22x_{18} \\
&\quad + 0,11x_{19} + 0,63x_{20} + 0,25x_{21} \geq 2,5
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,47x_1 + 0,51x_2 + 0,63x_3 + 0,62x_4 + 0,56x_5 + 0,59x_6 + 0,58x_7 + 0,46x_8 + 0,3x_9 + 0,12x_{10} \\
&\quad + 0,2x_{11} + 0,09x_{12} + 0,12x_{13} + 0,19x_{14} + 0,22x_{15} + 0,28x_{16} + 0,15x_{17} + 0,36x_{18} \\
&\quad + 0,15x_{19} + 0,73x_{20} + 0,46x_{21} \geq 3,5
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,014x_1 + 0,015x_2 + 0,006x_3 + 0,004x_4 + 0,0058x_5 + 0,0034x_6 + 0,0046x_7 + 0,0028x_8 + 0,001x_9 \\
&\quad + 0,0005x_{10} + 0,0006x_{11} + 0,0002x_{12} + 0,0005x_{13} + 0,0007x_{14} + 0,0007x_{15} \\
&\quad + 0,0005x_{16} + 0,0036x_{17} + 0,0044x_{18} + 0,0027x_{19} + 0,00x_{20} + 0,05x_{21} + 0,22x_{22} \\
&\quad + 0,34x_{23} + 0,167x_{24} \geq 0,048
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,0024x_1 + 0,0025x_2 + 0,0021x_3 + 0,0028x_4 + 0,0034x_5 + 0,003x_6 + 0,003x_7 + 0,0023x_8 \\
&\quad + 0,0093x_9 + 0,0039x_{10} + 0,0038x_{11} + 0,003x_{12} + 0,0043x_{13} + 0,0055x_{14} \\
&\quad + 0,0039x_{15} + 0,0041x_{16} + 0,007x_{17} + 0,0097x_{18} + 0,0064x_{19} + 0,0011x_{20} \\
&\quad + 0,0065x_{21} + 0,1865x_{22} + 0,0002x_{23} + 0,211x_{24} \geq 0,026
\end{aligned}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 \geq 4$$

$$\begin{aligned}
&x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} \\
&\quad + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leq 10
\end{aligned}$$

### 3.5 Sustav nejednadžbi za obrok u početku laktacije

Ciljana količina hranjivih tvari i energije u tablici 6. izračunata je na isti način kao i za rani suhostaj, a sustav nejednadžbi riješen je kako bi se ustanovio optimalan obrok za početak laktacije.

Tablica 6. Hranidbene potrebe krava u početku laktacije izražene u kg/ST

Hranjive tvari	Količina
SP (kg/ST)	2,925
UIP (kg/ST)	1,35
NEL (MJ/kg)	9,288
ADF (kg/ST)	3,15
NDF (kg/ST)	4,5
Ca (kg/ST)	0,1185
P (kg/ST)	0,063
Voluminoza (kg/ST)	6
Ukupna količina ST (Kg)	15

SP: sirovi proteini; UIP: proteini nerazgrađeni u buragu; NEL: neto energija za laktaciju; ADF: kisela detergent vlakna; NDF: neutralna detergent vlakna; Ca: kalcij; P: fosfor

$$0,17x_1 + 0,15x_2 + 0,1x_3 + 0,14x_4 + 0,12x_5 + 0,12x_6 + 0,12x_7 + 0,08x_8 + 0,17x_9 + 0,14x_{10} + 0,12x_{11} + 0,09x_{12} + 0,14x_{13} + 0,14x_{14} + 0,14x_{15} + 0,13x_{16} + 0,49x_{17} + 0,4x_{18} + 0,04x_{19} + 0,1x_{20} + 0,22x_{21} \geq 2,925$$

$$0,39x_1 + 0,42x_2 + 0,03x_3 + 0,025x_4 + 0,028x_5 + 0,025x_6 + 0,028x_7 + 0,025x_8 + 0,026x_9 + 0,022x_{10} + 0,048x_{11} + 0,033x_{12} + 0,05x_{13} + 0,032x_{14} + 0,04x_{15} + 0,035x_{16} + 0,023x_{17} + 0,17x_{18} + 0,11x_{19} + 0,19x_{20} + 0,026x_{21} + 0,044x_{22} \geq 1,35$$

$$4,77x_1 + 4,53x_2 + 4,78x_3 + 4,85x_4 + 4,78x_5 + 4,94x_6 + 4,78x_7 + 6,09x_8 + 6,42x_9 + 7,82x_{10} + 7,16x_{11} + 7,49x_{12} + 7,49x_{13} + 6,83x_{14} + 7,25x_{15} + 6,42x_{16} + 7,17x_{17} + 5,43x_{18} + 7,98x_{19} + 3,12x_{20} + 6,42x_{21} \geq 9,288$$



$$\begin{aligned}
&0,36x_1 + 0,39x_2 + 0,41x_3 + 0,37x_4 + 0,39x_5 + 0,39x_6 + 0,37x_7 + 0,27x_8 + 0,1x_9 + 0,04x_{10} \\
&\quad + 0,07x_{11} + 0,03x_{12} + 0,04x_{13} + 0,09x_{14} + 0,05x_{15} + 0,15x_{16} + 0,1x_{17} + 0,22x_{18} \\
&\quad + 0,11x_{19} + 0,63x_{20} + 0,25x_{21} \geq 3,15
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,47x_1 + 0,51x_2 + 0,63x_3 + 0,62x_4 + 0,56x_5 + 0,59x_6 + 0,58x_7 + 0,46x_8 + 0,3x_9 + 0,12x_{10} \\
&\quad + 0,2x_{11} + 0,09x_{12} + 0,12x_{13} + 0,19x_{14} + 0,22x_{15} + 0,28x_{16} + 0,15x_{17} + 0,36x_{18} \\
&\quad + 0,15x_{19} + 0,73x_{20} + 0,46x_{21} \geq 4,5
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,014x_1 + 0,015x_2 + 0,006x_3 + 0,004x_4 + 0,0058x_5 + 0,0034x_6 + 0,0046x_7 + 0,0028x_8 + 0,001x_9 \\
&\quad + 0,0005x_{10} + 0,0006x_{11} + 0,0002x_{12} + 0,0005x_{13} + 0,0007x_{14} + 0,0007x_{15} \\
&\quad + 0,0005x_{16} + 0,0036x_{17} + 0,0044x_{18} + 0,0027x_{19} + 0,00x_{20} + 0,05x_{21} + 0,22x_{22} \\
&\quad + 0,34x_{23} + 0,167x_{24} \geq 0,1185
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,0024x_1 + 0,0025x_2 + 0,0021x_3 + 0,0028x_4 + 0,0034x_5 + 0,003x_6 + 0,003x_7 + 0,0023x_8 \\
&\quad + 0,0093x_9 + 0,0039x_{10} + 0,0038x_{11} + 0,003x_{12} + 0,0043x_{13} + 0,0055x_{14} \\
&\quad + 0,0039x_{15} + 0,0041x_{16} + 0,007x_{17} + 0,0097x_{18} + 0,0064x_{19} + 0,0011x_{20} \\
&\quad + 0,0065x_{21} + 0,1865x_{22} + 0,0002x_{23} + 0,211x_{24} \geq 0,063
\end{aligned}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 \geq 6$$

$$\begin{aligned}
&x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} \\
&\quad + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leq 15
\end{aligned}$$

### 3.6 Sustav nejednadžbi za obrok u ranoj laktaciji

Ciljana količina hranjivih tvari i energije u tablici 7. izračunata je na isti način kao i za rani suhostaj, a sustav nejednadžbi riješen je kako bi se ustanovio optimalan obrok za ranu laktaciju.

Tablica 7. Hranidbene potrebe krava u ranoj laktaciji izražene u kg/ST

Hranjive tvari	Količina
SP (kg/ST)	5,01
UIP (kg/ST)	2,07
NEL (MJ/kg)	6,736
ADF (kg/ST)	5,7
NDF (kg/ST)	8,4
Ca (kg/ST)	0,18
P (kg/ST)	0,114
Voluminoza (kg/ST)	12
Ukupna količina ST (Kg)	30

SP: sirovi proteini; UIP: proteini nerazgrađeni u buragu; NEL: neto energija za laktaciju; ADF: kisela detergent vlakna; NDF: neutralna detergent vlakna; Ca: kalcij; P: fosfor

$$0,17x_1 + 0,15x_2 + 0,1x_3 + 0,14x_4 + 0,12x_5 + 0,12x_6 + 0,12x_7 + 0,08x_8 + 0,17x_9 + 0,14x_{10} + 0,12x_{11} + 0,09x_{12} + 0,14x_{13} + 0,14x_{14} + 0,14x_{15} + 0,13x_{16} + 0,49x_{17} + 0,4x_{18} + 0,04x_{19} + 0,1x_{20} + 0,22x_{21} \geq 5,01$$

$$0,39x_1 + 0,42x_2 + 0,03x_3 + 0,025x_4 + 0,028x_5 + 0,025x_6 + 0,028x_7 + 0,025x_8 + 0,026x_9 + 0,022x_{10} + 0,048x_{11} + 0,033x_{12} + 0,05x_{13} + 0,032x_{14} + 0,04x_{15} + 0,035x_{16} + 0,023x_{17} + 0,17x_{18} + 0,11x_{19} + 0,19x_{20} + 0,026x_{21} + 0,044x_{22} \geq 2,07$$

$$4,77x_1 + 4,53x_2 + 4,78x_3 + 4,85x_4 + 4,78x_5 + 4,94x_6 + 4,78x_7 + 6,09x_8 + 6,42x_9 + 7,82x_{10} + 7,16x_{11} + 7,49x_{12} + 7,49x_{13} + 6,83x_{14} + 7,25x_{15} + 6,42x_{16} + 7,17x_{17} + 5,43x_{18} + 7,98x_{19} + 3,12x_{20} + 6,42x_{21} \geq 6,736$$

$$\begin{aligned}
&0,36x_1 + 0,39x_2 + 0,41x_3 + 0,37x_4 + 0,39x_5 + 0,39x_6 + 0,37x_7 + 0,27x_8 + 0,1x_9 + 0,04x_{10} \\
&\quad + 0,07x_{11} + 0,03x_{12} + 0,04x_{13} + 0,09x_{14} + 0,05x_{15} + 0,15x_{16} + 0,1x_{17} + 0,22x_{18} \\
&\quad + 0,11x_{19} + 0,63x_{20} + 0,25x_{21} \geq 5,7
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,47x_1 + 0,51x_2 + 0,63x_3 + 0,62x_4 + 0,56x_5 + 0,59x_6 + 0,58x_7 + 0,46x_8 + 0,3x_9 + 0,12x_{10} \\
&\quad + 0,2x_{11} + 0,09x_{12} + 0,12x_{13} + 0,19x_{14} + 0,22x_{15} + 0,28x_{16} + 0,15x_{17} + 0,36x_{18} \\
&\quad + 0,15x_{19} + 0,73x_{20} + 0,46x_{21} \geq 8,4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,014x_1 + 0,015x_2 + 0,006x_3 + 0,004x_4 + 0,0058x_5 + 0,0034x_6 + 0,0046x_7 + 0,0028x_8 + 0,001x_9 \\
&\quad + 0,0005x_{10} + 0,0006x_{11} + 0,0002x_{12} + 0,0005x_{13} + 0,0007x_{14} + 0,0007x_{15} \\
&\quad + 0,0005x_{16} + 0,0036x_{17} + 0,0044x_{18} + 0,0027x_{19} + 0,00x_{20} + 0,05x_{21} + 0,22x_{22} \\
&\quad + 0,34x_{23} + 0,167x_{24} \geq 0,18
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,0024x_1 + 0,0025x_2 + 0,0021x_3 + 0,0028x_4 + 0,0034x_5 + 0,003x_6 + 0,003x_7 + 0,0023x_8 \\
&\quad + 0,0093x_9 + 0,0039x_{10} + 0,0038x_{11} + 0,003x_{12} + 0,0043x_{13} + 0,0055x_{14} \\
&\quad + 0,0039x_{15} + 0,0041x_{16} + 0,007x_{17} + 0,0097x_{18} + 0,0064x_{19} + 0,0011x_{20} \\
&\quad + 0,0065x_{21} + 0,1865x_{22} + 0,0002x_{23} + 0,211x_{24} \geq 0,114
\end{aligned}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 \geq 12$$

$$\begin{aligned}
&x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} \\
&\quad + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leq 30
\end{aligned}$$

### 3.7 Sustav nejednadžbi za obrok u srednjoj laktaciji

Ciljana količina hranjivih tvari i energije u tablici 8. izračunata je na isti način kao i za rani suhostaj, a sustav nejednadžbi riješen je kako bi se ustanovio optimalan obrok za sredinu laktacije.

Tablica 8. Hranidbene potrebe krava u srednjoj laktaciji izražene u kg/ST

Hranjive tvari	Količina
SP (kg/ST)	3,648
UIP (kg/ST)	2,07
NEL (MJ/kg)	6,15
ADF (kg/ST)	5,04
NDF (kg/ST)	7,2
Ca (kg/ST)	0,1464
P (kg/ST)	0,084
Voluminoza (kg/ST)	9,6
Ukupna količina ST (Kg)	24

SP: sirovi proteini; UIP: proteini nerazgrađeni u buragu; NEL: neto energija za laktaciju; ADF: kisela detergent vlakna; NDF: neutralna detergent vlakna; Ca: kalcij; P: fosfor

$$0,17x_1 + 0,15x_2 + 0,1x_3 + 0,14x_4 + 0,12x_5 + 0,12x_6 + 0,12x_7 + 0,08x_8 + 0,17x_9 + 0,14x_{10} + 0,12x_{11} + 0,09x_{12} + 0,14x_{13} + 0,14x_{14} + 0,14x_{15} + 0,13x_{16} + 0,49x_{17} + 0,4x_{18} + 0,04x_{19} + 0,1x_{20} + 0,22x_{21} \geq 3,648$$

$$0,39x_1 + 0,42x_2 + 0,03x_3 + 0,025x_4 + 0,028x_5 + 0,025x_6 + 0,028x_7 + 0,025x_8 + 0,026x_9 + 0,022x_{10} + 0,048x_{11} + 0,033x_{12} + 0,05x_{13} + 0,032x_{14} + 0,04x_{15} + 0,035x_{16} + 0,023x_{17} + 0,17x_{18} + 0,11x_{19} + 0,19x_{20} + 0,026x_{21} + 0,044x_{22} \geq 1,32$$

$$\begin{aligned}
&4,77x_1 + 4,53x_2 + 4,78x_3 + 4,85x_4 + 4,78x_5 + 4,94x_6 + 4,78x_7 + 6,09x_8 + 6,42x_9 + 7,82x_{10} \\
&\quad + 7,16x_{11} + 7,49x_{12} + 7,49x_{13} + 6,83x_{14} + 7,25x_{15} + 6,42x_{16} + 7,17x_{17} + 5,43x_{18} \\
&\quad + 7,98x_{19} + 3,12x_{20} + 6,42x_{21} \geq 6,15
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,36x_1 + 0,39x_2 + 0,41x_3 + 0,37x_4 + 0,39x_5 + 0,39x_6 + 0,37x_7 + 0,27x_8 + 0,1x_9 + 0,04x_{10} \\
&\quad + 0,07x_{11} + 0,03x_{12} + 0,04x_{13} + 0,09x_{14} + 0,05x_{15} + 0,15x_{16} + 0,1x_{17} + 0,22x_{18} \\
&\quad + 0,11x_{19} + 0,63x_{20} + 0,25x_{21} \geq 5,04
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,47x_1 + 0,51x_2 + 0,63x_3 + 0,62x_4 + 0,56x_5 + 0,59x_6 + 0,58x_7 + 0,46x_8 + 0,3x_9 + 0,12x_{10} \\
&\quad + 0,2x_{11} + 0,09x_{12} + 0,12x_{13} + 0,19x_{14} + 0,22x_{15} + 0,28x_{16} + 0,15x_{17} + 0,36x_{18} \\
&\quad + 0,15x_{19} + 0,73x_{20} + 0,46x_{21} \geq 7,2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,014x_1 + 0,015x_2 + 0,006x_3 + 0,004x_4 + 0,0058x_5 + 0,0034x_6 + 0,0046x_7 + 0,0028x_8 + 0,001x_9 \\
&\quad + 0,0005x_{10} + 0,0006x_{11} + 0,0002x_{12} + 0,0005x_{13} + 0,0007x_{14} + 0,0007x_{15} \\
&\quad + 0,0005x_{16} + 0,0036x_{17} + 0,0044x_{18} + 0,0027x_{19} + 0,00x_{20} + 0,05x_{21} + 0,22x_{22} \\
&\quad + 0,34x_{23} + 0,167x_{24} \geq 0,1464
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,0024x_1 + 0,0025x_2 + 0,0021x_3 + 0,0028x_4 + 0,0034x_5 + 0,003x_6 + 0,003x_7 + 0,0023x_8 \\
&\quad + 0,0093x_9 + 0,0039x_{10} + 0,0038x_{11} + 0,003x_{12} + 0,0043x_{13} + 0,0055x_{14} \\
&\quad + 0,0039x_{15} + 0,0041x_{16} + 0,007x_{17} + 0,0097x_{18} + 0,0064x_{19} + 0,0011x_{20} \\
&\quad + 0,0065x_{21} + 0,1865x_{22} + 0,0002x_{23} + 0,211x_{24} \geq 0,084
\end{aligned}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 \geq 9,6$$

$$\begin{aligned}
&x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} \\
&\quad + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leq 24
\end{aligned}$$

### 3.8 Sustav nejednadžbi za obrok u kasnoj laktaciji

Ciljana količina hranjivih tvari i energije u tablici 9. izračunata je na isti način kao i za rani suhostaj, a sustav nejednadžbi riješen je kako bi se ustanovio optimalan obrok za kasnu laktaciju.

Tablica 9. Hranidbene potrebe krava u kasnoj laktaciji izražene u kg/ST

Hranjive tvari	Količina
SP (kg/ST)	2,82
UIP (kg/ST)	0,92
NEL(MJ/kg)	5,69
ADF (kg/ST)	4,8
NDF (kg/ST)	6,4
Ca (kg/ST)	0,124
P (kg/ST)	0,064
Voluminoza (kg/ST)	8
Ukupna količina ST (Kg)	20

SP: sirovi proteini; UIP: proteini nerazgrađeni u buragu; NEL: neto energija za laktaciju; ADF: kisela detergent vlakna; NDF: neutralna detergent vlakna; Ca: kalcij; P: fosfor

$$0,17x_1 + 0,15x_2 + 0,1x_3 + 0,14x_4 + 0,12x_5 + 0,12x_6 + 0,12x_7 + 0,08x_8 + 0,17x_9 + 0,14x_{10} + 0,12x_{11} + 0,09x_{12} + 0,14x_{13} + 0,14x_{14} + 0,14x_{15} + 0,13x_{16} + 0,49x_{17} + 0,4x_{18} + 0,04x_{19} + 0,1x_{20} + 0,22x_{21} \geq 2,82$$

$$0,39x_1 + 0,42x_2 + 0,03x_3 + 0,025x_4 + 0,028x_5 + 0,025x_6 + 0,028x_7 + 0,025x_8 + 0,026x_9 + 0,022x_{10} + 0,048x_{11} + 0,033x_{12} + 0,05x_{13} + 0,032x_{14} + 0,04x_{15} + 0,035x_{16} + 0,023x_{17} + 0,17x_{18} + 0,11x_{19} + 0,19x_{20} + 0,026x_{21} + 0,044x_{22} \geq 0,92$$

$$\begin{aligned}
&4,77x_1 + 4,53x_2 + 4,78x_3 + 4,85x_4 + 4,78x_5 + 4,94x_6 + 4,78x_7 + 6,09x_8 + 6,42x_9 \\
&\quad + 7,82x_{10} + 7,16x_{11} + 7,49x_{12} + 7,49x_{13} + 6,83x_{14} + 7,25x_{15} + 6,42x_{16} \\
&\quad + 7,17x_{17} + 5,43x_{18} + 7,98x_{19} + 3,12x_{20} + 6,42x_{21} \geq 5,69
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,36x_1 + 0,39x_2 + 0,41x_3 + 0,37x_4 + 0,39x_5 + 0,39x_6 + 0,37x_7 + 0,27x_8 + 0,1x_9 + 0,04x_{10} \\
&\quad + 0,07x_{11} + 0,03x_{12} + 0,04x_{13} + 0,09x_{14} + 0,05x_{15} + 0,15x_{16} + 0,1x_{17} \\
&\quad + 0,22x_{18} + 0,11x_{19} + 0,63x_{20} + 0,25x_{21} \geq 4,8
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,47x_1 + 0,51x_2 + 0,63x_3 + 0,62x_4 + 0,56x_5 + 0,59x_6 + 0,58x_7 + 0,46x_8 + 0,3x_9 + 0,12x_{10} \\
&\quad + 0,2x_{11} + 0,09x_{12} + 0,12x_{13} + 0,19x_{14} + 0,22x_{15} + 0,28x_{16} + 0,15x_{17} \\
&\quad + 0,36x_{18} + 0,15x_{19} + 0,73x_{20} + 0,46x_{21} \geq 6,4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,014x_1 + 0,015x_2 + 0,006x_3 + 0,004x_4 + 0,0058x_5 + 0,0034x_6 + 0,0046x_7 + 0,0028x_8 \\
&\quad + 0,001x_9 + 0,0005x_{10} + 0,0006x_{11} + 0,0002x_{12} + 0,0005x_{13} + 0,0007x_{14} \\
&\quad + 0,0007x_{15} + 0,0005x_{16} + 0,0036x_{17} + 0,0044x_{18} + 0,0027x_{19} + 0,00x_{20} \\
&\quad + 0,05x_{21} + 0,22x_{22} + 0,34x_{23} + 0,167x_{24} \geq 0,124
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,0024x_1 + 0,0025x_2 + 0,0021x_3 + 0,0028x_4 + 0,0034x_5 + 0,003x_6 + 0,003x_7 + 0,0023x_8 \\
&\quad + 0,0093x_9 + 0,0039x_{10} + 0,0038x_{11} + 0,003x_{12} + 0,0043x_{13} + 0,0055x_{14} \\
&\quad + 0,0039x_{15} + 0,0041x_{16} + 0,007x_{17} + 0,0097x_{18} + 0,0064x_{19} + 0,0011x_{20} \\
&\quad + 0,0065x_{21} + 0,1865x_{22} + 0,0002x_{23} + 0,211x_{24} \geq 0,064
\end{aligned}$$

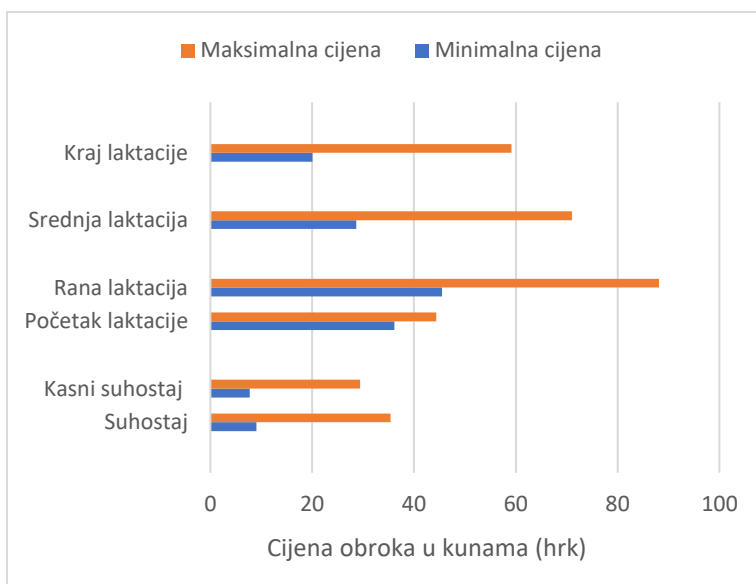
$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 \geq 8$$

$$\begin{aligned}
&x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} \\
&\quad + x_{18} + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leq 20
\end{aligned}$$

## 4 Rezultati i rasprava

### 4.1 Cijena koštanja obroka

Na grafikonu 1 su prikazane minimalne i maksimalne cijene obroka za milječne krave po pojedinim fazama proizvodnje. Iz grafikona se jasno može vidjeti da je najveća cijenovna razlika obroka bila u suhostaju (obje faze suhostaja), a najmanja u ranoj laktaciji. Dobiveni rezultati indirektno ukazuju na najmanju mogućnost manipulacije obrokom u ranoj laktaciji. Dobiveni rezultati, pod pretpostavkom raspoloživosti krmiva korištenih u analizi, ukazuju na mogućnost značajnog preplaćivanja obroka vodeći se isključivo zadovoljavanjem hranidbenih potreba ne mareći za cijenu obroka. Osim u grafu 1., cijena svakog obroka je prikazana i u tablicama sastava obroka (tablice 10.-15.).



Grafikon 1. Minimalna i maksimalna cijena koštanja obroka u kunama (hrk).



## 4.2 Udio pojedinih krmiva u obroku

U tablicama 10., 11. i 12. prikazani su sastavi najjeftinijih obroka za 6 proizvodnih faza dobivenih rješavanjem optimizacijskog problema. Od ponuđenih 24 krmiva, u svih 6 optimalnih obroka od voluminoznih krmiva uključeno je bilo uključeno sijeno lucerke i livadno sijeno, a od koncentrata sojina sačma, sojino zrno i pšenične posije. Zrna žitarica i silaže nisu bili odabrani niti u jednom obroku.

Tablica 10. Sastav najjeftinijih obroka za rani i kasni suhostaj

Rani Suhostaj			Kasni suhostaj		
Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)	Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)
Sijeno lucerke	2,85	3,2	Sijeno lucerke	5,64	6,34
Livadno sijeno	7,53	8,56	Livadno sijeno	0,87	0,98
Pšenično posije	0,88	0,97	Pšenično posije	1,14	1,27
Cijena	9,05		Cijena	7,75	

Tablica 11. Sastav najjeftinijih obroka za početak i ranu laktaciju

Početak laktacije			Rana laktacija		
Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)	Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)
Sijeno djeteline	7	7,95	Sijeno djeteline	18,43	20,95
Pšenično posije	3	3,33	Pšenično posije	6	6,67
Sojina sačma	2,3	2,56	Sojina sačma	2,87	3,19
Prženo sojino zrno	2,7	3,07	Prženo sojino zrno	2,7	3,07
Cijena	36,13		Cijena	45,51	

Tablica 12. Sastav najjeftinijih obroka za srednju i kasnu laktaciju

Srednja laktacija			Kasna laktacija		
Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)	Krmivo	kg/ST	Krmivo
Sijeno djeteline	6,51	7,4	Sijeno djeteline	8,7	9,89
Livadno sijeno	9,99	11,35	Livadno sijeno	2,03	2,31
Pšenico posije	4,8	5,33	Pšenico posije	4	4,44
Prženo sojino zrno	2,7	3,07	Prženo sojino zrno	1,58	1,79
Cijena	28,63		Cijena	20,07	

U tablicama 13., 14. i 15. prikazani su sastavi najskupljih obroka za 6 proizvodnih faza dobivenih rješavanjem sustava nejednadžbi.

Tablica 13. Sastav najskupljih obroka za rani i kasni suhostaj

Rani suhostaj			Kasni suhostaj		
Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)	Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)
Sijeno djeteline	5,92	6,73	Sijeno lucerke	3,77	4,23
Silaža zobi	0,65	1,85	Silaža pšenice	0,23	0,71
Sojina sačma	1,4	1,56	Sojina sačma	3	3,33
Suncokretova sačma	2,1	2,28	Suncokretova sačma	0,5	0,54
Prženo sojino zrno	1,4	1,59	Prženo sojino zrno	1,5	1,7
Suncokretovo sjeme	1,4	1,56	Suncokretovo sjeme	1	1,11
Mono- dikalcij fosfat	1,13	1,17			
Cijena	35,41		Cijena	29,43	

Tablica 14. Sastav najskupljih obroka za početak i sredinu laktacije

Početak laktacije			Rana laktacija		
Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)	Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)
Sijeno lucerke	6	6,74	Sijeno lucerke	12	13,48
Sojina sačma	4,5	5	Sojina sačma	9	10
Prženo sojino zrno	2,25	2,56	Prženo sojino zrno	4,5	5,11
Suncokretovo sjeme	1,5	1,67	Suncokretovo sjeme	3	3,33
Mono- dikalcij fosfat	0,75	0,77	Mono- dikalcij fosfat	1,5	1,55
Cijena		45,51	Cijena		88,16

Tablica 15. Sastav najskupljih obroka za sredinu laktacije i kasnu laktaciju

Srednja laktacija			Kasna laktacija		
Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)	Krmivo	kg/ST	Krmivo(as fed)
Sijeno lucerke	9,6	10,79	Sijeno lucerke	8	8,99
Sojina sačma	7,2	8	Sojina sačma	6	6,67
Prženo sojino zrno	3,6	4,09	Prženo sojino zrno	3	3,41
Suncokretovo sjeme	2,4	2,67	Suncokretovo sjeme	2	2,22
Mono- dikalcij fosfat	1,2	1,24	Mono- dikalcij fosfat	1	1,03
Cijena		71,03	Cijena		59,17

### 4.3 Rasprava

Optimalni obroci su uključivali sijeno lucerke, livadno sijeno, pšenične posije, sojinu sačmu i sojino zrno dok zrnavlje žitarica i silaže nisu bili odabrani kao sastavnice optimalnog obroka u niti jednoj proizvodnoj fazi mliječnih krava. Moguć razlog tomu je njihov nepovoljniji odnos hranjivih tvari i cijene u odnosu na druge koncentrate i voluminoze (sijeno). Ovdje treba napomenuti kako su cijene voluminoza aproksimirane što znači da dobiveni rezultati odgovaraju ovoj konstelaciji cijena koje ne moraju biti odraz realnih cijena obzirom na prilike formiranja cijena voluminoze u praksi. Program je sastavljen tako da optimizira minimalnu cijenu zadovoljavajući pritom hranidbene potrebe krava uz data ograničenja na maksimalne udjele pojedinih krmiva u obroku, što znači da dobivene rezultate treba sagledati sa dozom opreza i tumačiti ih sukladno imputima ovog operacijskog istraživanja. U skladu s očekivanjima, najjeftiniji obrok je bio onaj za rani suhostaj, koji je najmanje energetski zahtjevan i za koji se traži najmanje unosa suhe tvari, u iznosu od 14 kg. Najskuplji obrok i kod minimalne i kod maksimalne cijene koštanja je bio onaj za ranu laktaciju, što je i očekivano, budući da se za ovu fazu proizvodnje u pravilu traži najveća konzumacija suhe tvari, a taj je obrok i najzahtjevniji sa stanovišta energije i kemijskog sastava. Hipotetski gledano, program bi se najbolje mogao koristiti neposredno prilikom kupnje pojedinih krmiva, budući da bi varijacija cijene nekog krmiva mogla značajno utjecati na udio ostalih.

Najjeftiniji obrok se za svih 6 faza uspio sastaviti bez upotrebe mineralnih krmiva. Kod najskupljih obroka, svi osim onoga za rani i kasni suhostaj koriste dikalcijev fosfat za postizanje ciljanih vrijednosti kalcija i fosfora. Dakle, ovisno o cijenama, dodavanje mineralnih krmiva rezultira skupljim obrokom uz iste učinke, što ukazuje da je njihova opća prisutnost u praksi više stvar običaja, ili posljedica ograničene dostupnosti raznolikih krmiva na tržištu, nego potrebe. Čak i kada se uveo popust od 30 % na cijenu mineralnih krmiva, program ih nije birao u obrok, vjerojatno zato što u sebi nemaju drugih sastojaka. Također je zanimljivo da kada nema dodatnih ograničenja količine krepkih krmiva u obroku, koja navodi Grbeša (2014.), potrebno je izabrati neko mineralno krmivo u maloj količini. Razlog je tome što su krepka krmiva bogata proteinima i

energijom te ih algoritam preferira u velikim količinama, pri čemu ih onda ipak treba malo dopunjavati mineralnim krmivima.

U ovom su radu prikazani samo najjeftiniji i najskuplji obroci za svaku proizvodnu fazu, no s ovako je velikim izborom krmiva moguće izraditi i mnoštvo drugih obroka. Primjerice, u situaciji kad uzgajivač već ima na dispoziciji određena krmiva, moguće je vrlo jednostavno „forsirati“ njihovo uključivanje u obrok. Također, moguće je zabraniti korištenje nekog krmiva u obroku ili, ovisno o situaciji na tržištu, dodatnim ograničenjima sastaviti obrok koristeći samo jedan tip voluminoznog krmiva. Pri tome treba očekivati da će obrok biti skuplji ukoliko ima manje ponuđenih krmiva, a više dodatnih ograničenja. U ovom radu je uzeto u obzir da postoji znatno više krmiva, njih 24, nego traženih kemijskih komponenti obroka, njih 7, stoga ne čudi da obrok koji zadovoljava sve kemijske uvjete sadrži mali broj krmiva te su mnoga od ponuđenih krmiva suvišna. Da je situacija obrnuta, npr. da se traži uravnoteživanje 7 kemijskih faktora sa svega 3 do 4 krmiva, zasigurno bi sva bila odabrana u nekom postotku. Matematički govoreći, kad je broj vektora daleko veći od dimenzije prostora, mnogi od njih su redundantni.

Ovakav program sastavlja obrok potpuno objektivno, imajući u vidu samo zadana ograničenja, ali proizvođač treba imati na umu da ponekad ova rješenja ne moraju biti prikladna za praktičnu upotrebu. Domaće životinje, a posebno preživači, su osjetljive na nagle promjene sastava obroka koje često rezultiraju metaboličkim poremećajima, dok se životinja ne navikne na novi obrok, stoga je važno promisliti hoće li se promjena obroka na onaj jeftiniji dugoročno isplatiti. Uvođenjem ograničenja koja odražavaju sadašnji sastav obroka, program u načelu omogućuje postupni prijelaz na optimalni obrok.

Program je fleksibilan i njime se mogu računati i obroci za druge kategorije životinja, a može biti koristan za bilo kojeg proizvođača koji neki dio hranidbe svojih životinja osigurava na tržištu. Za razliku od nekih postojećih programa, koji su determinirani svojim unutarnjim bazama podataka, ulaz ovog programa se može vrlo lako mijenjati ukoliko proizvođač želi upotrijebiti neki drugi skup hranidbenih normativa, ili ima na raspolaganju drugačije podatke o kemijskom sastavu krmiva. Ovaj je program i robusan i bez teškoća prihvaća bilo kakva dodatna ograničenja vezana za sastav obroka. Rukovanje programom u sadašnjem obliku je zahtjevnije nego, primjerice,

Microsoft Excel-om, ali nudi i više mogućnosti. Stoga bi bilo zanimljivo implementirati ga kao aplikaciju na pametnom telefonu, kojom bi se svatko mogao jednostavno služiti u realnom vremenu, tijekom nabave krmiva. S obzirom da cijena znatno utječe na profitabilnost proizvodnog pogona, fleksibilnost programa bi najviše došla do izražaja pri nestabilnom tržištu, gdje cijena krmiva značajno varira između ponuđača i od godine do godine.

## 5 Zaključak

Ovim operacijskim istraživanjem je potvrđena mogućnost vrlo fleksibilne primjene optimizacije pri sastavljanju obroka sa minimalnom cijenom koštanja u R programskom okruženju. Pojam fleksibilna optimizacija u ovom kontekstu podrazumijeva postavljanje velikog broja ograničenja pri sastavljanju cjenovno najpovoljnijeg obroka za muzne krave.

Obzirom na korištenje Excel tablice kao inputa u procesu optimiziranja obroka, osnovnim poznavanjem rada Microsoft Excel-a ili sličnog tabličnog programa relativno lako se mogu mijenjati i nadopunjavati hranidbene potrebe, kemijski sastav krmiva te njihova cijena čineći ovu metodologiju vrlo prilagodljivom specifičnim zahtjevima uzgajivača.

Utvrđenim razlikama između cjenovno najpovoljnijih i najskupljih obroka ukazano je na mogućnost primjene ekonomski sub-optimalne hranidbe muznih krava ukoliko se pri sastavljanju obroka ne vodi računa o cijeni koštanja obroka. Rad na ovom istraživanju je također rezultirao spoznajom kako koncept optimizacije pored hranidbe može biti učinkovito primijenjen i na ostale aspekte stočarske proizvodnje.

Obzirom na izrazito velik udio troškova hranidbe u ukupnim troškovima proizvodnje kravljeg mlijeka, korištenje optimizacije pri sastavljanju obroka otvara značajnu mogućnost za unaprjeđenje profitabilnosti farma mliječnih krava u velikim sustavima, kao i kod malih i srednjih proizvođača u uvjetima velikih fluktuacija cijena krmiva na tržištu.

## 6 Literatura

1. Čaklović L. (2010.) Geometrija linearnog programiranja. Hrvatska sveučilišna naknada. Zagreb.
2. Dent J. B., Casey H. (1967.) Linear Programming and Animal Nutrition. C Lockwood. Sjedinjene Američke Države.
3. Domačinović M., Đidora M., Solić D., Šperanda M (2019.) Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek. Osijek.
4. Domančinović M., Antunović Z., Mijić P., Šperanda M., Kralik D., Đidara M., Zmajčić K. (2008.): Proizvodnja mlijeka. Naklada. Osijek.
5. Feed Composition Table (2015.). Date Last Modified: March 2015.  
<https://www.beefmagazine.com/sites/beefmagazine.com/files/uploads/2015/02/2015-BEEF-Magazine-Feed-Comp-Tables.pdf> - pristup 6.7.2020. -pristup 8.7.2020.
6. Forenbacher, S. (1975.): Klinička patologija probave i resorpcije. Svezak I/1. Sveučilišna naklada Liber. Zagreb.
7. Grbeša D. (2004.) Metode procjene kemijskog sastava i hranjive vrijednosti krepkih krmiva. Hrvatsko agronomsko društvo. Zagreb.
8. Grbeša D., Samaržija D. (1994.) Hranidba i kakvoća mlijeka. Mljekarstvo. 44 (2) 119-132.
9. Grubić G., Adamović M. (2003.) Ishrana visokoproizvodnih krava. Beograd
10. Herdt T. H. (2014.) Nutritional Requirements of Dairy Cattle. Michigan State University. Sjedinjene Američke Države.
11. Hossain M. E., Das G. B., Akbar M. A. (2015.) Formulation of least cost dairy ration for small scale dairy farms using „solver add-ins“ in Microsoft Excel. Iranian Journal of Applied Animal Science 5(3) 561-567
12. Ivanković A., Mijić P. (2020.) Govedarstvo. Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet. Zagreb.
13. Jenkins T. C. (2002.) Feed Supplements. U: Fats and Protected Fats. Encyclopedia of Dairy Sciences. Elsevier. Ujedinjeno Kraljevstvo. Str. 997-1003



- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122272358003710> -pristup 2.7.2021.
14. Lalman, D., Gill D., Steele J. (2000.) Feeding whole soybeans or drought or frost damaged soybeans to beef cattle. Oklahoma Cooperative Extension Service. Sjedinjene Američke Države.
  15. Mazon G. (2010.) Why should I have two groups of dry dairy groups. Cooperative extension service, University of Kentucky. Sjedinjene Američke Države. URL: <https://afs.ca.uky.edu/content/management-practices-close-dairy-cows> -pristup 27.6.2021.
  16. Michel Berkelaar and others (2020.). lpSolve: Interface to 'Lp\_solve' v. 5,5 to Solve Linear/Integer Programs. R package version 5,6,15. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=lpSolve>
  17. Morales L. E., Wilen J. E., Robinson P. H., Fadel G. J. (2013.) A linear programming model to optimize diets in environmental policy scenarios. Journal of dairy science. 95(3):1267-82
  18. PanonMix, (2013.). Dostupno na: <http://www.panonmix.info/proizvodi>- pristupano 29.6.2021.
  19. Patil V., Gupta R., Rajendran D., Kuntal R. S. ( 2017.) Design and validation of ration formulation of cattle- a research investigation. International Journal of control theory and systems. 9 (42)
  20. Pavličević A., Grubić G., Koljajić V., Đorđević N., Jovanović R.D., Đukić S., Kovačević D.N. (1996.): Priprema modela programiranja ishrane krava u toku proizvodnog ciklusa. Poljoprivreda, SPITS, Beograd, str. 381-382.
  21. R Core Team (2020.). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>
  22. RStudio Team (2019.). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL: <http://www.rstudio.com/>
  23. Salookolayi D. D., Yansari T. A., Nasseri S. H. (2011.) Application of fuzzy optimization in diet formulation. The journal of mathematics and computer science 2(3) 459-468

24. Saxena P. (2017.) Modeling and algorithm development for cattle feed mix formulation. International journal of computational research. 13: 141-159
25. Suresh A. V. (2016.) Feed Formulation Software. Aqua feed formulation. Academic press. Str. 21-32
26. Tržišni cjenovni informacijski centar u poljoprivredi (2018.) Prosjek tjednih cijena krmiva za 2018. godinu.
27. TSH „Gašpar“ (2021.) Cijena komponenti krmnih smjesa  
[http://www.gaspar.hr/index.php/cjenik\\_komponenti](http://www.gaspar.hr/index.php/cjenik_komponenti) - pristup 2.2.2021.
28. Tvornica stočne hrane „Gašpar“ (2021) Cjenik komponenti obroka.
29. Van Saun, R. J. (1991.) Dry nutrition. The key to improving fresh cow performance. The Veterinary Clinics Of North America. Food Animal Practice. Sjedinjene Američke Države
30. Waugh F. V. (1951.) The minimum cost dairy feed- An application of Linear Programming. American Journal of Agricultural Economics. 33:(3) str. 299-310

## 7 Prilog

### 7.1 Tablica mjernih jedinica

Mjerna jedinica	Kratica
Mega đul po kilogramu	MJ/kg
Kilogram u suhoj tvari	kg/ST
Kilogram	kg
Gram	g
Hrvatska kuna	kn

### 7.2 Puni naziv kemijskih komponenti

Kratica	Puni naziv (eng.)	Puni naziv (hrv.)
CP	Crude protein	Sirovi protein
UIP	undegradable intake protein	Protein nerazgradiv u buragu
RDP	Rumen degraded protein	Protein razgradiv u buragu
NDF	Neutral detergent fiber	Neutralna detergent vlakna
ADF	Acidic detergent fiber	Kisela detergent vlakna
Ca	Calcium	Kalcij
P	phosphorous	Fosfor

### 7.3 Popis slika

Slika 1. Kemijska struktura škroba (*str. 3*)

Slika 2. Horizontalni silos za silažu (*str. 10*)

Slika 3. Balirana sjenaža (*str. 12*)

## 7.4 Popis tablica

- Tablica 1. Ograničenja količine krepkih krmiva u obroku (*str. 21*)
- Tablica 2. Hranidbene potrebe krava po proizvodnim fazama (*str. 22*)
- Tablica 3. Kemijski sastav i cijena voluminoznih i koncentriranih krmiva (*str. 23*)
- Tablica 4. Kemijske potrebe obroka za mliječne krave u ranom suhostaju, izražene u kg/ST (*str. 27*)
- Tablica 5. Kemijske potrebe obroka za mliječne krave u kasnom suhostaju, izražene u kg/ST (*str. 29*)
- Tablica 6. Kemijske potrebe obroka za mliječne krave u početku laktacije, izražene u kg/ST (*str. 31*)
- Tablica 7. Kemijske potrebe obroka za mliječne krave u ranoj laktaciji, izražene u kg/ST (*str. 33*)
- Tablica 8. Kemijske potrebe obroka za mliječne krave u srednjoj laktaciji, izražene u kg/ST (*str. 35*)
- Tablica 9. Kemijske potrebe obroka za mliječne krave u kasnoj laktaciji, izražene u kg/ST (*str. 38*)
- Tablica 10. Sastav najjeftinijih obroka za rani i kasni suhostaj (*str. 41*)
- Tablica 11. Sastav najjeftinijih obroka za početak laktacije i ranu laktaciju (*str. 41*)
- Tablica 12. Sastav najjeftinijih obroka za srednju i kasnu laktaciju (*str. 42*)
- Tablica 13. Sastav najskupljih obroka za rani i kasni suhostaj (*str. 43*)
- Tablica 14. Sastav najskupljih obroka za početak laktacije i ranu laktaciju (*str. 43*)
- Tablica 15. Sastav najskupljih obroka za srednju i kasnu laktaciju (*str. 44*)

## 7.5 Popis grafikona

- Grafikon 1. Minimalne i maksimalne cijene koštanja obroka (*str. 37*)

## 8 Životopis

Andrija Sunko rođen je 12,12,1994. godine u Zagrebu. Upisuje Klasičnu Gimnaziju u Zagrebu 2009. godine, a završava ju 2013. godine, nakon čeka upisuje preddiplomski studij "Animalne znanosti" na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, koji završava 2018. godine te upisuje diplomski studij "Proizvodnja i prerada mlijeka" na istom fakultetu. Tijekom studija je 2018. godine volontirao na konferenciji "Annual Meeting of the European Federation of Animal Science" (EAAP) u Dubrovniku. Student je u ljetu 2018. godine u Pirovcu radio kao vodič i biljeter na izložbi školjaka privatne kolekcije "Triton", koja u sebi broji preko 1400 primjeraka školjaka, puževa, glavonožaca, mnogoljušturaša i koponožaca iz svih svjetskih mora te sačinjava jednu od najvećih malakoloških kolekcija u Europi. Odlično govori i piše engleski jezik te se izvrsno snalazi u Microsoft Office programskom paketu, a ima iskusta i u radu u programskom okruženju R. Nositelj je plavog pojasa u Brazilskom jiu jitsu-u, borilačkoj vještini sličnoj hrvanju.