



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ



Секция „ИНФОРМАЦИОННИ ПРОЦЕСИ И СИСТЕМИ ЗА ПОДКРЕПА НА РЕШЕНИЯ“

Диелза Шани Бериша

Оптимизационни стратегии и алгоритми за решаване на проблеми на здравната система по време на пандемия

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор“

Професионално направление: 4.6. „Информатика и компютърни науки“

Докторска програма „Информатика“

Научен ръководител:

проф. д-р Васил Георгиев Гуляшки

София, 2026 г.

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на секция „Информационни процеси и системи за подпомагане на вземането на решения“ към ИИКТ–БАН, проведено на 17.06.2026 г.

Дисертацията е структурирана в увод, четири глави, общи заключения за постигнатите резултати, приноси към дисертацията, списък с публикации, свързани с дисертацията, декларация за оригиналност, библиография и приложения. Дисертацията има общо 186 страници, 36 фигури, 58 таблици и 125 библиографски източника.

Защитата на дисертацията ще се проведе на 2026 г. от часа в зала на бл. 2 на ИИКТ–БАН на открито заседание на научно жури в състав:

Научно жури:

1.
2.
3.
4.
5.

Рецензиите и мненията на членовете на научното жури и рефератът на дисертацията са публикувани на уебсайта на ИИКТ–БАН. Материалите за защитата са на разположение на всички желаещи в стая на ИИКТ–БАН, бл. 2, ул. „Акад. Г. Бончев“, София.

Автор: **Диелза Бериша**

Заглавие: **Оптимизационни стратегии и алгоритми за решаване на проблеми в здравната система по време на пандемия**

Ключови думи

Управление на здравеопазването по време на пандемия; оптимизация на здравеопазването; епидемиологично прогнозиране; SEIR-kNN; линейно програмиране със смесени цели числа; симулация на дискретни събития; разпределение на болничния капацитет; управление на търсенето в интензивно отделение; надеждна подкрепа за вземане на решения; казус за COVID-19 в Косово.

Въведение

Пандемията от COVID-19 показва, че съвременните здравни системи са изложени на сложни, бързо развиващи се и силно несигурни кризисни условия. Внезапното увеличение на инфекциите, хоспитализациите, търсенето на интензивни грижи, натиска върху работната сила и недостига на медицински консумативи разкриха, че управлението на пандемията не може да се третира само като клиничен или епидемиологичен проблем. То е и проблем, свързан с оптимизацията и подкрепата на решенията, тъй като вземащите решения трябва да разпределят оскъдни ресурси, да координират болниците, да оценяват бъдещото търсене и да поддържат непрекъснатост на услугите, докато информацията е непълна и условията се променят с времето.

Тази дисертация е фокусирана върху оптимизационни стратегии и алгоритми за решаване на проблеми в здравните системи по време на пандемия. Изследването е позиционирано на пресечната точка на епидемиологичното моделиране, оперативните изследвания, разпределението на ресурсите в здравеопазването, прогнозирането, базирано на машинно обучение, и оценката, базирана на симулация. Основната ѝ идея е, че реакцията на пандемията може да бъде подобрена, когато прогнозирането, оптимизацията и оперативната симулация не се разработват като отделни инструменти, а се интегрират в една съгласувана рамка за подпомагане на вземането на решения.

Дисертацията обръща специално внимание на здравните системи с ограничени ресурси, като Косово е използвано като емпиричен казус. Такива системи често се сблъскват с ограничен болничен капацитет, фрагментирано отчитане на данни, ограничена аналитична инфраструктура и неравномерен регионален достъп до здравни услуги. Тези характеристики правят разработването на мащабируеми, прозрачни и практически приложими методи за оптимизация особено важно.

Централният изследователски проблем на дисертацията може да се изрази по следния начин: как епидемиологичното прогнозиране, оптимизацията на ресурсите в здравеопазването и симулацията на болничната дейност могат да бъдат интегрирани в мащабируема и отчитаща несигурността рамка за подпомагане на решенията за подобряване на управлението на здравеопазването по време на пандемия в системи с ограничени ресурси? Този проблем включва няколко взаимосвързани подпроблема, включително оценка на бъдещото търсене на здравни услуги, преобразуване на инфекциите в показатели за болници и интензивни отделения, разпределяне на търсенето при ограничения на капацитета и оценка на

оперативните резултати чрез време на чакане, използване, незадоволено търсене и устойчивост.

Основната цел на тази дисертация е да се разработи и оцени интегрирана хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения, която комбинира епидемиологично прогнозиране, разпределение на ресурсите, базирано на оптимизация, и симулация на дискретни събития за подобряване на производителността на здравната система по време на пандемични условия. Рамката свързва епидемиологично моделиране, базирано на SEIR, параметрична адаптация, поддържана от k -най-близки съседи, линейно програмиране със смесени цели числа и симулация на дискретни събития в един съгласуван работен процес.

Научната новост се състои в структурираната интеграция на прогнозиране, предписване, оперативно валидиране и адаптивна обратна връзка. Прогнозните резултати се трансформират в индикатори за търсене, индикаторите за търсене се използват в оптимизационни модели, а резултатите от оптимизацията се оценяват чрез оперативни сценарии, базирани на симулация. Този подход подкрепя по-базирано на доказателства, адаптивно и оперативно осъществимо вземане на решения за пандемия в среда на здравеопазване с ограничени ресурси.

Глава 1 – Преглед на литературата относно стратегиите за оптимизация и алгоритмите за справяне с предизвикателствата пред здравните системи по време на пандемии

1.1 Въведение

Тази глава представя систематичен и критичен преглед на стратегиите за оптимизация, математическите модели и рамките за подпомагане на вземането на решения, разработени за справяне с предизвикателствата пред здравните системи по време на пандемии. Прегледът се фокусира върху интеграцията на епидемиологичното прогнозиране, планирането на капацитета на здравеопазването, координацията на веригата за доставки, икономическите съображения, механизмите за управление и поведенческата динамика. Особено внимание е обърнато на приложимостта, мащабируемостта и оперативната осъществимост на тези подходи в здравни системи с ограничени ресурси.

Пандемията от COVID-19 представляваше безпрецедентен глобален системен шок. От появата си в края на 2019 г. тя генерира едновременно натиск върху здравните, икономическите и социалните системи. Световната здравна организация (СЗО) оцени приблизително 14,9 милиона допълнителни смъртни случая през 2020-2021 г., като в повечето засегнати страни се съобщава за претоварване на отделенията за интензивно лечение (ОИЛ) [1]. Дори високоразвитите здравни системи изпитваха сериозен недостиг на легла в ОИЛ, вентилатори, обучен медицински персонал, ваксини и основни медицински консумативи. Този недостиг беше допълнително изострен от прекъсвания в глобалните

вериги за доставки на медицински продукти, изчерпване на работната сила, свързано с инфекции, и бързо променящото се търсене от страна на пациентите.

1.2. Системно многоизмерно въздействие на пандемията

Пандемията от COVID-19 показва, че съвременните здравни кризи не са изолирани епидемиологични събития, а сложни системни сътресения, засягащи едновременно здравеопазването, икономическите и социалните подсистеми. Между 2020 и 2021 г. Световната здравна организация (СЗО) е оценила приблизително 14,9 милиона допълнителни смъртни случая в световен мащаб, докато претоварване на отделенията за интензивно лечение (ОИЛ) е регистрирано в повечето засегнати страни [1]. Освен пряката смъртност, пандемията предизвиква каскадни смущения на пазарите на труда, образователните системи и публичните финанси, засилвайки съществуващите структурни неравенства.

За разлика от по-ранни огнища като SARS (2003) или H1N1 (2009), COVID-19 се разгърна в рамките на силно взаимосвързани глобални мрежи, характеризиращи се с интензивна мобилност, тясно свързани вериги за доставки и синхронизирани политически отговори. Тази структурна взаимосвързаност усили системния стрес и създаде обратна връзка между напрежението в здравната система, икономическото свиване и социалните смущения. По този начин пандемията разкри ограниченията на изолираните политически и моделиращи подходи и подчерта необходимостта от интегрирани рамки за подкрепа на решения, способни да се справят с многослойните взаимодействия в условия на несигурност.

1.2.1. Натоварване на здравната система и претоварване на интензивното отделение

Най-видимата проява на системен стрес по време на COVID-19 беше бързото насищане на капацитета на болниците и интензивните отделения. Сериозен недостиг на легла, вентилатори, кислородни запаси и обучен персонал се наблюдаваше както в страните с високи доходи, така и в страните с ниски и средни доходи (СНИД). В няколко региона заетостта на интензивните отделения надвишаваше базовия капацитет по време на пиковите вълни, което налагаше разширяване на инфраструктурата за спешни случаи, междурегионални трансфери на пациенти и временни полеви болници.

1.2.2. Икономически смущения и компромиси между здравеопазването и икономиката

Мерките в общественото здравеопазване, необходими за овладяване на предаването на вируса, включително блокади, ограничения на мобилността и затваряне на сектори, генерираха дълбоки макроикономически ефекти. Световният БВП се сви с приблизително 3,4% през 2020 г. и бяха загубени над 220 милиона работни места на пълен работен ден, което непропорционално засегна неформалните работници, жените и младото население [2], [3].

1.2.3. Социални неравенства, поведенческа хетерогенност и ограничения на достъпа

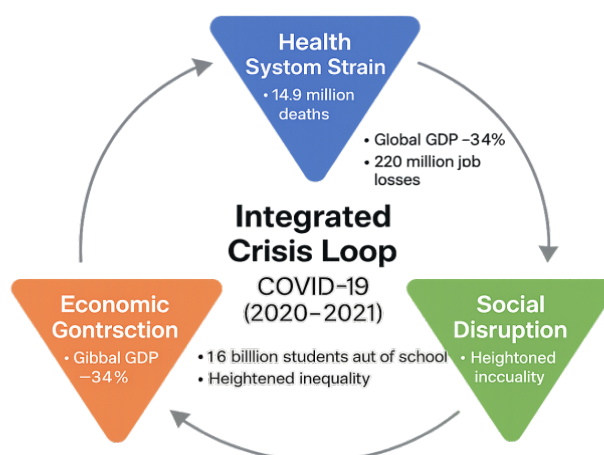
Пандемията не засегна населението равномерно. COVID-19 разкри и засили съществуващите социални неравенства, тъй като рискът от инфекция, хоспитализация и смъртност се определяше от условията на живот, професионалните рискове, нивото на доходите, гъстотата на жилищата и достъпа до здравни услуги. Смушенията в образованието също се превърнаха във важна социална последица: продължителното затваряне на училищата засегна около 1,6 милиарда ученици по целия свят и задълбочи загубите на знания сред групите с ниски доходи, селските райони и дигитално изключените групи [4].

Тези неравенства са пряко свързани с оптимизацията на пандемията, тъй като търсенето на здравни грижи, поведенческите реакции и достъпът до услуги не могат да се приемат за хомогенни в различните региони или групи от населението. Различията в доверието, здравната грамотност, наличието на тестове, достъпа до лечение и приема на ваксинации повлияха както на епидемиологичните резултати, така и на справедливостта на реакцията на здравната система. Следователно, моделите за подпомагане на вземането на решения трябва да отчитат поведенческата хетерогенност и ограниченията на достъпа, особено в условия с ограничени ресурси, където ограниченият капацитет и регионалните различия могат бързо да доведат до неравносложни резултати в здравеопазването.

1.2.4. Перспектива на интегрираната система

Таблица 1.1. Размери на въздействието на пандемията през 2020-2021 г.

Размер	Ключови показатели	Източници
Въздействие върху здравето	Приблизително 14,9 милиона смъртни случая (преки и косвени); претоварване на интензивните отделения е докладвано в повече от 70% от страните	[1]
Икономическо въздействие	Свиване на глобалния БВП с -3,4% през 2020 г.; загуба на над 220 милиона работни места на пълен работен ден	[2], [3]
Социално въздействие	Около 1,6 милиарда ученици са засегнати от затварянето на училища; засилено неравенство в страните с ниски и средни доходи	[4]



Фигура 1.1. Интегриран кризисен цикъл, свързващ здравните, икономическите и социалните последици от пандемията.

Доказателствата в здравната, икономическата и социалната област показват, че пандемията от COVID-19 представлява многопластова системна криза, характеризираща се със засилващи се обратни връзки. Претоварването на здравната система предизвиква ограничителни мерки в общественото здравеопазване; тези мерки доведоха до свиване на икономиката и социални смущения; а нарастващото неравенство и поведенческите реакции от своя страна повлияха на динамиката на инфекциите и търсенето на здравни грижи.

1.2.5 Анализ на критичните пропуски и последици

Доказателствата, разгледани в раздели 1.2.1-1.2.4, показват, че COVID-19 е генерирал тясно свързани здравни, икономически и социални смущения, образувайки засилващи се обратни връзки, които не могат да бъдат решени с изолирани аналитични инструменти. Въпреки че литературата предлага сложни модели за прогнозиране, планиране на капацитета, логистика и анализ на политиките [5], практическото внедряване често е ограничено от забавянето на данните, ограничени изчислителни ресурси и слаби ограничения на междудоменната интеграция, които се усилват в здравните системи с ограничени ресурси.

1.3. Категории стратегии за оптимизация и координация

Пандемията от COVID-19 показва, че ефективното управление на пандемията изисква координирани интервенции в множество области, интегриращи механизми за управление на политическо ниво с усъвършенствани, алгоритмично управлявани технически решения. Емпиричните доказателства от кризата с COVID-19 показват, че фрагментираните подходи ограничават способността на вземащите решения да предвиждат ефекти от обратна връзка в различни области, което води до забавени реакции, неефективно разпределение на ресурсите и непоследователни политически резултати. Традиционните, изолирани подходи, при които епидемиологията, логистиката и социално-икономическите политики се разглеждат поотделно, се оказали недостатъчни за смекчаване на каскадните кризи. Вместо това, изследванията и практиката подчертаха значението на холистичните, основани на данни стратегии, които комбинират множество слоеве за вземане на решения [5]. Проучванията в областта на управлението и публичната администрация също подчертават, че институционалната координация и информационните потоци са решаващи за справянето с кризи.

1.3.1 Парадигми на епидемиологично и предсказващо моделиране

Точното епидемиологично прогнозиране представлява аналитичната основа за вземане на решения по време на пандемия. Прогнозите за траекториите на инфекциите, търсенето на хоспитализации и пиковата интензивност пряко влияят върху планирането на капацитета на здравеопазването, разпределението на ресурсите и времето за прилагане на политиките. През последните десетилетия подходите за прогнозиране са се развили от класически компартментни модели до хибридни икономико-епидемиологични структури и, по-скоро, до системи за прогнозиране, подобрени с машинно обучение.

1.3.2 Здравни операции и оптимизация на капацитета

Докато епидемиологичните модели оценяват траекториите на инфекциите и пиковите на търсенето, оптимизацията на здравните операции превръща прогнозираното търсене в решения за разпределение на ресурсите, които могат да бъдат предприети. По време на пандемии, оперативното вземане на решения включва разпределението на легла в интензивни отделения (ОИЛ), вентилатори, медицински персонал, инфраструктура за тестване и междуболнични трансфери при сериозна несигурност и ограничения във времето [6]. Тази оперативна перспектива се подкрепя от изследванията на здравните операции и литературата за планиране на болничния капацитет [6].

1.3.3 Оптимизация на веригата за доставки и логистиката

Реакцията на пандемията зависи не само от капацитета на болниците, но и от устойчивостта и координацията на веригите за доставки в здравеопазването. Недостигът на лични предпазни средства (ЛПС), вентилатори, кислород, фармацевтични продукти и ваксини по време на COVID-19 разкри структурни слабости в глобално взаимосвързаните производствени и дистрибуторски мрежи. За разлика от конвенционалните вериги за доставки, оптимизирани за ефективност и минимизиране на разходите, веригите за доставки в здравеопазването по време на пандемии трябва да дадат приоритет на надеждността, гъвкавостта и бързата реакция. Докладите за дигиталната трансформация и логистиката на здравеопазването допълнително подчертават видимостта, проследимостта и координацията като централни изисквания за веригата за доставки по време на кризисни условия.

1.3.4 Многоцелева и икономическо-здравна оптимизация

Пандемичният отговор по своята същност включва конкуриращи се цели. Политиките, предназначени да сведат до минимум нивата на заразяване и смъртност, могат да наложат значителни икономически разходи, докато бързото възобновяване на икономиката може да предизвика нови вълни на предаване и претоварване на здравната система. Следователно, управлението на пандемията не може да бъде адекватно представено като едноцелево оптимизационно решение; по-скоро то изисква формални многоцелеви рамки за решения, способни да балансират защитата на здравето, икономическата устойчивост и социалното равенство в условията на несигурност.

1.3.5 Оптимизация, съобразена с принципите на равенство и справедливост

Пандемията засяга непропорционално уязвимите групи от населението, разкривайки структурни неравенства в достъпа до здравеопазване, социално-икономическите условия и институционалния капацитет. Традиционните модели за оптимизация, ориентирани към ефективност, фокусирани върху минимизиране на общата смъртност или недостига на ресурси, могат неволно да изострят неравенствата, ако съображенията за равенство не са изрично включени.

1.3.6 Рамки за вземане на решения, базирани на симулация, и адаптивни рамки за вземане на решения

Пандемичните мерки се развиват в условията на бързо променяща се несигурност. Статичните оптимизационни модели, дори когато са многоцелеви, могат да станат неоптимални, тъй като динамиката на инфекциите, поведенческите реакции и наличността на ресурси се променят с течение на времето. Това е мотивирало разработването на симулационни и адаптивни рамки за подпомагане на вземането на решения.

1.4 Критичен преглед и установени пропуски

Този раздел синтезира доказателствата, разгледани в раздели 1.1-1.3, и идентифицира методологичните, оперативните и контекстуалните пропуски, които ограничават ефективността в реалния свят на настоящите подходи за оптимизация на пандемите и подкрепа на решенията. В литературата се наблюдава значителен напредък в прогнозирането, болничните операции, логистиката и анализа на политиките; практическото им приложение обаче остава ограничено от фрагментация, ограничения в данните, изчислителни затруднения, недостатъчна интеграция на справедливостта и слаби ограничения за адаптивност в реално време, които са особено остри в здравните системи с ограничени ресурси, като например Косово.

1.4.1 Подходи за фрагментирано моделиране и подкрепа на решения

Доминиращо ограничение е постоянството на изолираното моделиране. Повечето проучвания оптимизират изолирани подсистеми, като например капацитет и трансфери в интензивни отделения, прогнозиране и оценка на интервенциите, логистична устойчивост или приоритизиране на ваксинациите, без оперативно свързана системна архитектура, която да поддържа координирани решения в различните области. В резултат на това, дори силни, специфични за дадена област модели често не успяват да подкрепят съгласувани политически избори, когато капацитетът на здравеопазването, ограниченията в доставките и поведенческото съответствие взаимодействат динамично.

1.4.2 Надеждност на данните, навременност и ограничения на информационния поток

Втората празнина се отнася до осъществимостта на данните в кризисни условия. Много рамки за оптимизация и симулация имплицитно предполагат навременни, стандартизирани, висококачествени потоци от данни за прием, заетост на интензивни отделения, персонал, инвентаризация, тестване и наблюдение. На практика данните често са забавени, непълни и непоследователни, особено в контекста на страни с ниски и средни доходи, което подкопава калибрирането, валидирането и актуализирането в реално време. По-ранни проучвания на операциите също подчертават, че качеството на данните и структурите за отчитане силно определят използваемостта на системите за подпомагане на вземането на решения в общественото здравеопазване [6].

1.4.3 Мащабируемост и изчислителна сложност

Дори когато данните са налични, осъществимостта в реално време е ограничена от изчислителното натоварване. Многоетапното стохастично програмиране и големите MILP формулировки могат да станат трудни за обработка с нарастването на дърветата на сценариите, докато AI/метаевристичното прогнозиране и циклите за симулация-оптимизация може да изискват дълги времена на изпълнение, които са несъвместими с критични във времето кризисни операции. Надеждните формулировки могат да намалят необходимостта от големи дървета на сценариите, като заменят обширното стохастично изброяване с обработваеми множества от неопределеност, предлагайки практически компромис между устойчивостта и изчислителната осъществимост в критични във времето условия [7].

1.4.4 Ограничения на равенството и контекстуалната адаптация

Въпреки че моделите за разпределение, съобразени с справедливостта, представляват важен методологичен напредък, равенството все още често се третира като спомагателна характеристика, а не като основно измерение на дизайна. Формално, напрежението между ефективността и равенството е проблем на многокритериалната оптимизация, при който приемливостта на политиката зависи от прозрачни компромиси, а не от чисто утилитарни цели [8]. На практика, *ad hoc* скаларизационните тегла могат да вграждат нормативни допускания, които остават имплицитни; многокритериалната оптимизация осигурява по-ясна структура за извличане и документиране на такива компромиси [8]. По-широката литература за равенството в здравеопазването също показва, че разпределителните въздействия трябва да се третират като централни ограничения на дизайна, а не като последващи мисли.

1.4.5 Недостатъчна подкрепа за вземане на решения в реално време и адаптивна подкрепа

Въпреки напредъка в DES и ABM, сравнително малко проучвания постигат напълно интегриран, адаптивен процес в реално време, който свързва прогнозирането, оперативната оптимизация и оценката, базирана на симулация, по метода на „плъзгащ се хоризонт“ [5]. Архитектурите за решения с „плъзгащ се хоризонт“ са тясно свързани с теорията за Моделно-предсказващо управление (MPC), където политиките се оптимизират многократно при актуализирани оценки на състоянието и оперативни ограничения. За мащабни системи с неопределеност и размерност, приблизителното динамично програмиране предлага изчислително жизнеспособни алтернативи за вземане на решения в почти реално време. Моделите за прогнозиране обикновено се оценяват по статистическа точност, а не по техния принос към качеството на решенията надолу по веригата при неопределеност. Междувременно, оперативната оптимизация често предполага детерминистично търсене или слабо представя разпространението на неопределеността.

1.4.6 Синтез на идентифицираните пропуски в изследванията

Таблица 1.2. Синтез на пропуските в изследванията, установени в прегледа на литературата

Пропаст	Идентифициран проблем	Последици за дисертацията
Фрагментация	Прогнозирането, логистиката, болничните операции и собственият капитал често се моделират отделно.	Рамката трябва да свързва прогнозирането, разпределението и симулацията.
Осъществимост на данните	Данните в реално време може да са забавени, непълни или непоследователни.	Моделът трябва да работи с несвършена информация и несигурност.
Мащабируемост	Усъвършенстваните модели може да са твърде сложни за внедряване в кризисни ситуации.	Необходими са модели с намален порядък и изчислително осъществими модели.
Равенство и контекст	Справедливостта и ограниченията на страните с ниски и средни доходи често са второстепенни.	Равенството и местната осъществимост трябва да се превърнат в модели.
Адаптивност	Статичните модели не могат да актуализират решенията при промяна на условията.	Необходима е логика за обратна връзка с подвижен хоризонт.

Критичният преглед идентифицира пет взаимосвързани пропуски, които съвместно ограничават подкрепата за вземане на решения по време на пандемия в реалния свят:

1.5 Заключение, цел на изследването и задачи на изследването

1.5.1 Заключение

Литературата, разгледана в тази глава, демонстрира значителен напредък в моделирането на отговора на пандемията, включително напредък в епидемиологичното прогнозиране, оптимизирането на здравните операции, координацията на веригите за доставки, разпределението, съобразено с равнопоставеността, и оценката, базирана на симулации. Въпреки това опитът с COVID-19 разкри, че специфичната за дадена област методологична сложност не се превръща автоматично в оперативна стойност на решенията при кризисни условия.

Повтаряща се констатация е несъответствието между допусканията на модела и ограниченията на реалния свят. Много усъвършенствани рамки изискват навременни, стандартизирани потоци от данни и значителни изчислителни ресурси, докато реалните среди за вземане на решения, особено в здравните системи с ограничени ресурси, се характеризират със забавено отчитане, фрагментирани информационни потоци, ограничен аналитичен капацитет и институционални ограничения. Тези реалности намаляват осъществимостта на сложни модели точно когато бързата адаптация е най-необходима.

Главата допълнително показва, че управлението на пандемията е по своята същност многоцелево и междудоменно: решенията за разширяване на капацитета, приоритизиране на

логистиката и интервенции трябва да се оценяват съвместно с съображения за справедливост и поведенчески реакции. В резултат на това, ефективната подкрепа за вземане на решения изисква интегрирани архитектури, които свързват прогнозирането, оптимизацията и симулацията по начин, който обхваща непрекъснатост, като същевременно изрично обработват несигурността и поддържат изчислителната осъществимост.

Тези заключения установяват мотивацията за изследователската цел и задачи на дисертацията, които се фокусират върху разработването на интегрирана, мащабируема и адаптивна хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения, съобразена с ограничени ресурси здравни системи, с особен акцент върху Косово.

1.5.2 Цел на изследването

Надграждайки върху критичния синтез, представен в раздели 1.1-1.5.1, основната цел на настоящата дисертация е формулирана, както следва:

Целта на тази дисертация е да се разработи интегрирана, мащабируема и отчитаща несигурността хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения, която обединява епидемиологичното прогнозиране, оптимизацията на ресурсите в здравеопазването, координацията на логистиката и съображенията за равенство в рамките на изчислително ефективна архитектура, подходяща за внедряване в реално време в здравни системи с ограничени ресурси.

Предложената рамка има за цел да преодолее разликата между методологичната сложност и оперативната осъществимост чрез:

- изрично включване на несигурността в епидемиологичните и оперативните данни;
- вграждане на ограниченията за равенство и контекстуални ограничения като структурни компоненти на модела, а не като спомагателни критерии;
- осигуряване на изчислителна мащабируемост, съвместима с ограничена аналитична инфраструктура;
- позволявайки адаптивно вземане на решения с подвижен хоризонт при условия на несвършени и забавени данни.

Рамката е специално разработена и валидирана в контекста на Косово и сравними здравни системи с ниски и средни доходи, като същевременно запазва възможността за обобщаване към по-широки среди за управление на кризи.

1.5.3 Изследователски задачи

За постигане на поставената изследователска цел, дисертацията разглежда следните взаимосвързани изследователски задачи:

Задача 1 – Концептуално и системно моделиране

Разработете унифицирана системна архитектура, която формално свързва:

- разширени епидемиологични модели от тип SEIR,
- капацитет на здравеопазването и разпределение на ресурсите на интензивното отделение,

- ограничения във веригата за доставки и логистиката,
- поведенчески и съобразени с равенството променливи при вземане на решения.

Тази задача установява структурната интеграция, необходима за преодоляване на фрагментацията, посочена в Глава 1.

Задача 2 – Разработване на оптимизационно ядро, съобразено с неопределеността

Проектирайте и внедрете хибриден модул за оптимизация, който:

- интегрира многоетапно стохастично програмиране (MSSP) и нелинейни формулировки, съобразени с равнопоставеността (NLP);
- включва стабилно или базирано на сценарии управление на несигурността;
- балансира целите за ефективност и справедливост в рамките на многокритериална структура.

Тази задача директно се занимава с идентифицираните пропуски, свързани с разпространението на несигурността и интеграцията на капитала.

Задача 3 – Интегриране със симулация на дискретни събития (DES)

Вградете ядрото за оптимизация в среда за симулация на дискретни събития (DES), за да:

- моделиране на потоци от пациенти, болнични операции и логистични процеси;
- оценяват политическите решения при динамични и несигурни условия;
- да се даде възможност за стрес тестове, базирани на сценарии, за устойчивост на здравната система.

Тази задача осигурява оперативен реализъм и подкрепя адаптивното вземане на решения с подвижен хоризонт.

Задача 4 – Изчислителна мащабируемост и опростяване на модела

Разработване на изчислително ефективни стратегии за решения, включително:

- епидемиологични представяния от редуциран порядък,
- леки метаевристики, където точната оптимизация е неосъществима,
- техники за мащабируемо намаляване на сценарии.

Целта е да се гарантира осъществимост в среди с оскъдни данни и ограничена инфраструктура, като например Косово.

Задача 5 – Контекстуална валидация и оценка на политиките

Калибриране и валидиране на интегрираната рамка, използвайки данни, представителни за Косово и сравними здравни системи, и:

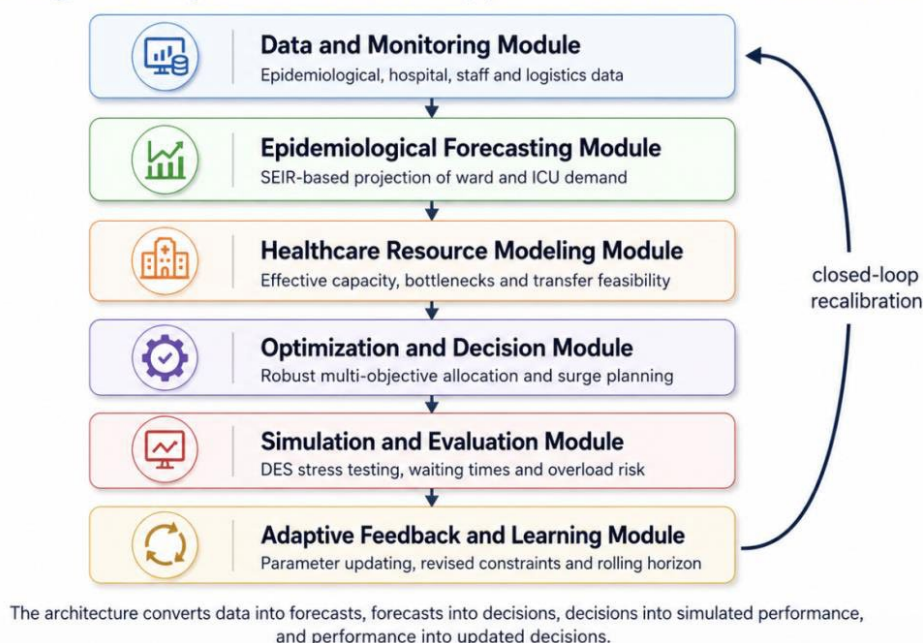
- да се оценят компромисите между капацитета на здравеопазването, логистичната осъществимост и резултатите, свързани с равнопоставеността;
- оценяване на надеждността при сценарии със закъснели и непълни данни;
- изготвяне на практически препоръки за управление на кризи в реално време.

Изпълнението на тези изследователски задачи осигурява структуриран път от идентифициране на теоретични пропуски до разработването на внедряема, интегрирана хибридна система за подпомагане на вземането на решения. Следователно, следващата глава представя методологичните основи и математическите формулировки, които са в основата на предложената рамка.

Глава 2. Предложени модели и методология: Предложена интегрирана хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения

2.1 Въведение в предложената изследователска рамка

Integrated Hybrid Decision-Support Framework Architecture



Фигура 2.1. Цялостна архитектура на Интегрираната хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения.

Тази глава представя методологичната основа на дисертацията и въвежда Интегрирана хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения (IHDSF) за оптимизация на здравната система по време на пандемия. Рамката свързва епидемиологично прогнозиране, моделиране на здравните ресурси, стабилна многоцелева оптимизация, валидиране, базирано на симулация, и адаптивен контрол с обратна връзка в единна структура за подпомагане на вземането на решения. Целта ѝ е да трансформира несигурната епидемиологична информация в оперативни решения, свързани с болничния капацитет, използването на интензивното отделение, преместването на пациенти, разполагането на персонала, активиране на капацитета при повишена нужда и разпределение на ресурсите при спешни случаи [5]-[10].

За разлика от подходите за статично планиране, предложената методология третира управлението на здравеопазването по време на пандемия като динамичен процес на вземане на решения. Процентът на заразяване, вероятността за хоспитализация, процентът на приемане в интензивно отделение, процентът на възстановяване, наличността на персонал, осъществимостта на трансферите и забавянията на отчитането могат да се променят за кратки интервали от време. Следователно, решения, които изглеждат осъществими при едно информационно състояние, могат да станат неосъществими или неефективни, когато се включат нови наблюдения. Следователно IHDSF е проектиран като рамка със затворен

цикъл, в която прогнозите, ограниченията, политиките за разпределение, резултатите от симулациите и обратната връзка се актуализират многократно.

2.2 Формално определение на проблема и обхват на изследването

Формалното дефиниране на проблема е необходимо, тъй като отговорът на здравеопазването при пандемия съдържа много взаимодействащи решения, но не всички от тях са променливи на решенията на предложения модел. Дисертацията разграничава ендегенните решения, които моделът може да препоръча, и екзогенните условия, които се третират като данни, параметри или сценарии. Това разграничение предотвратява рамката да стане или твърде тясна, за да поддържа регионална координация, или твърде широка, за да остане изчислително и институционално реалистична.

Централният проблем с вземането на решения може да бъде изразен в оперативни термини, както следва: при несигурни траектории на инфекциите, хоспитализациите и търсенето в интензивните отделения, както и при ограничен капацитет на здравеопазването, разпределен в мрежа от заведения, се определя последователност от решения за разпределение, прехвърляне, персонал и увеличаване на капацитета, която намалява предотвратимия недостиг и претоварване, като същевременно се спазват клиничните, логистичните и институционалните ограничения. Това определение запазва фокуса върху координацията на здравната система, а не върху оптимизацията на политиката на ниво население.

2.2.1 Дефиниция на системата и обхват на решението

Обхватът на решенията е по-скоро тактически, отколкото чисто стратегически или клиничен, свързан с лечението на пациентите. Тактическата координация включва решения, които могат да бъдат преразглеждани в рамките на дни или седмици, като например преразпределение на пациентите, активиране на капацитет за спешни случаи, преразпределение на персонала или приоритизиране на оскъдни ресурси за трансфер. Стратегическите решения, като например изграждането на нови болници или препроектирането на националната здравна политика, се вземат в по-дълги времеви мащаби и са извън обхвата на оптимизацията. Клиничните решения, свързани с лечението на пациентите, като например диагноза, преценка за триаж и планове за лечение на отделни пациенти, остават под ръководството на клиничните специалисти.

2.2.2 Множества, състояния, решения и неопределеност

Векторът на състоянието комбинира епидемиологична и оперативна информация, тъй като нито едно от измеренията не е достатъчно само по себе си. Епидемиологичната информация обяснява бъдещия натиск върху търсенето, докато оперативната информация обяснява дали здравната мрежа може да поеме това търсене. Например, прогнозираното увеличение на инфекциите е оперативно релевантно само когато се преобразува в прогнозирана заетост на отделенията, търсене на интензивно отделение, нужди от персонал и нужди от трансфери.

2.2.3 Представяне на търсенето, капацитета и недостига

Променливата на недостига е централна за методологията, защото тя превръща претоварването в експлицитен математически обект. В условия на тежка пандемия, принуждаването на цялото търсене да бъде обслужено може да направи оптимизационния модел неприложим, докато игнорирането на излишното търсене би скрило клиничните последици от претоварването. Чрез въвеждане на неотрицателната променлива на недостига, моделът остава решим при екстремно търсене, като същевременно силно санкционира незадоволената нужда в целевата функция [6].

2.2.4 Надеждна многоцелева формулировка на проблема

Целевата функция е многоцелева, тъй като отговорът на здравеопазването при пандемия включва конкуриращи се приоритети. Минимизирането на незадоволеното търсене е клинично спешно, но политика, която минимизира недостига чрез прехвърляне на много пациенти, може да надхвърли капацитета на спешната медицинска помощ или да създаде ненужен логистичен риск. Политика, която минимизира прехвърлянията, може да бъде полесна за прилагане, но може да претовари локализираните болници. Многоцелевата структура прави тези компромиси ясни и позволява на вземащите решения да избират тежести на приоритетите или приемливи прагове [8].

2.2.5 Нива на решения и контекст на заинтересованите страни

Основното ниво на вземане на решения, адресирано от IHDSF, е регионалната координация. Данните на болнично ниво предоставят информация за местния капацитет и заетост, докато регионалните власти координират трансферите, ресурсите за спешни случаи и балансирането на натоварването в мрежата. Политиките на национално ниво определят по-широката среда на сценариите, като влияят върху динамиката на преноса, наличността на ресурси за спешни случаи, стандартите за кризи и институционалните правила. Тези национални политики се третираат като екзогенни параметри на сценариите, а не като директни променливи на решенията в оптимизационния модел.

2.3 Моделиране на допускания и ограничения

Предложената IHDSF се основава на явни допускания за моделиране, които определят обхвата и интерпретацията на епидемиологичните, ресурсните, оптимизационните, симулационните и адаптивно-контролните компоненти. Пандемичната здравна система съдържа биологични, поведенчески, логистични, институционални и политически механизми, които не могат да бъдат представени на едно и също ниво на детайлност в рамките на податлив модел за подпомагане на вземането на решения. Предположенията в този раздел определят условията, при които предложените модели са валидни и значими [6].

Предположенията са групирани в три категории: епидемиологични предположения, предположения за наличност и качество на данните, както и изчислителни и институционални ограничения. Целта на този раздел не е да се разработи пълният SEIR

модел, пълният ресурсен модел или пълният модел за оптимизация. Тези компоненти са разработени в раздели 2.5, 2.6 и 2.7. Раздел 2.3 вместо това изяснява условията на моделиране, които подкрепят по-късните формулировки.

2.3.1 Епидемиологични допускания

Предположението за частична стабилност е особено важно. Параметрите на пандемията могат да се променят поради нови варианти, поведенческа адаптация, промени в тестването, ефекти от ваксинацията, подобрения в лечението или политически интервенции. Въпреки това, в рамките на кратък интервал на планиране е разумно параметрите да се апроксимират като достатъчно стабилни, за да се генерират оперативни прогнози. Рехалибрирането с плавен хоризонт позволява на модела да актуализира тези параметри, когато станат налични нови данни [9].

2.3.2 Предположения за наличност и качество на данните

Ограниченията в качеството на данните не са просто технически неудобства; те пряко влияят върху качеството на решенията. Недостатъчното отчитане на инфекциите може да забави разпознаването на бъдещ натиск върху болниците, докато забавените данни за заетостта на интензивните отделения могат да доведат до подценяване на непосредственото претоварване от оптимизационния слой. По подобен начин, непоследователните дефиниции на наличните легла могат да създадат изкуствен капацитет, ако леглата се отчитат без персонала или оборудването, необходими за използването им.

2.3.3 Изчислителни и институционални ограничения

Изчислителните ограничения изискват баланс между реализъм и проследимост. Включването на всеки отделен пациент, член на персонала, линейка и клинична пътека в оптимизационния модел би затруднило многократното решаване на проблема в условия на „подвижен хоризонт“. Следователно предложената структура използва агрегирани променливи за решения в оптимизационния модел и стохастични детайли за потока от пациенти в слоя DES. Това разделение на труда запазва оперативната актуалност, като същевременно прави предписателния модел управляем [6].

2.4 Архитектура на интегрираната хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения

Интегрираната хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения е проектирана като архитектура със затворен цикъл, която свързва епидемиологично прогнозиране, моделиране на здравните ресурси, надеждна оптимизация, оценка, базирана на симулация, и адаптивна обратна връзка. Целта ѝ е да трансформира наблюдаваните епидемиологични и оперативни данни в решения за разпределение, трансфер и увеличаване на капацитета, които остават осъществими при несигурност [6].

Рамката се състои от шест взаимосвързани модула: модул за данни и мониторинг, модул за епидемиологично прогнозиране, модул за моделиране на здравни ресурси, модул за

оптимизация и вземане на решения, модул за симулация и оценка и модул за адаптивна обратна връзка. Тези модули не са независими блокове; изходът на всеки модул става вход за следващите модули, а обратната връзка от симулацията и наблюдаваните данни актуализира по-ранни допускания, ограничения и параметри.

2.4.1 Цялостна системна архитектура

Архитектурата разделя аналитичните задачи, като същевременно запазва тяхното взаимодействие. Прогнозирането генерира оценки на търсенето, но тези оценки не се използват директно като решения. Моделирането на ресурсите преобразува търсенето в натиск върху капацитета. Оптимизацията трансформира натиска и ограниченията в кандидати за действия. Симулацията тества тези действия при стохастична променливост. Обратната връзка актуализира системата за следващия цикъл на вземане на решения. Тази модулна структура прави рамката прозрачна и по-лесна за валидиране [5], [7].

2.4.2 Информационен поток и механизми за обратна връзка

Обратната връзка не се ограничава само до коригиране на грешки в прогнозите. Тя също така идентифицира структурни слабости в предложените решения. Например, симулацията може да разкрие, че оптимизирана политика създава прекомерни опашки в интензивното отделение, че план за прехвърляне претоварва капацитета на спешната медицинска помощ в пикови часове или че заведение с номинален свободен капацитет не може да поеме пациенти, защото наличността на персонал е намаляла. Тези сигнали за обратна връзка могат да бъдат преобразувани в допълнителни ограничения, корекции на санкциите или предупредителни индикатори [5], [10].

2.5 Компонент за епидемиологично моделиране

Епидемиологичният компонент е предсказващият двигател на IHDSF. Неговата цел е да превърне динамиката на предаване на болестите в оперативни сигнали за търсене на грижи в отделенията и интензивните отделения. В контекста на управлението на здравеопазването по време на пандемия, самото прогнозиране на инфекциите не е достатъчно. Здравните власти се нуждаят от прогнози за приема в болници, търсенето в интензивните отделения, тежестта на състоянието на пациентите, възстановяването, за да планират разпределението на ресурсите и координацията на капацитета [9].

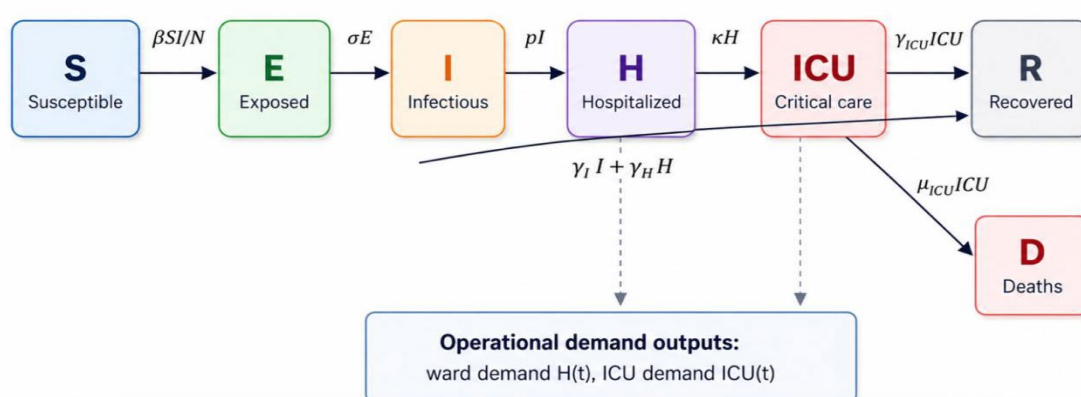
Епидемиологичният модел, използван в тази дисертация, трябва да отговаря на три изисквания. Той трябва да бъде епидемиологично интерпретируем, изчислително обработваем за многократно калибриране и директно свързан с изискванията за здравни ресурси. Поради тази причина дисертацията възприема SEIR-базирана компартментна структура, разширена с компартменти за хоспитализация, интензивно отделение, възстановяване и смъртност.

2.5.1 Избор на подход за моделиране, базиран на SEIR

Структурата SEIR е съвместима и с времевата скала на планирането на здравеопазването. Търсенето в болниците и интензивните отделения обикновено реагира на динамиката на инфекциите със закъснение и това закъснение може да бъде представено чрез експонирани, инфекциозни, хоспитализирани и интензивни отделения. Следователно моделът поддържа краткосрочни и средносрочни прогнози, които са полезни за решения като активиране на пика, преразпределение на персонала и планиране на трансфер между заведенията [9].

2.5.2 Разширена структура SEIR-H-ICU-D

Extended SEIR-H-ICU-D Forecasting Structure



Фигура 2.2. Разширена SEIR-H-ICU-D структура за прогнозиране, свързваща динамиката на инфекциите с търсенето в отделенията и интензивните отделения.

Таблица 2.1. Основни епидемиологични състояния и оперативно значение

Нотация	Определение	Оперативна интерпретация
S(t)	Чувствителна популация	Лица, изложени на риск от инфекция
E(t)	Изложено население	Заразени, но все още не заразни лица
I(t)	Заразна популация	Лица, способни да предават
H(t)	Хоспитализирани пациенти	Търсене на здравни услуги на ниво район
Интензивно отделение(т)	Пациенти в интензивно отделение	Търсене на интензивно лечение и натиск върху ресурсите в интензивното отделение
D(t)	Починало население	Състояние на поглъщаща смъртност

Допълнителните отделения H и ICU са от съществено значение, защото представляват пряката оперативна тежест върху болниците. Стандартният SEIR модел може да прогнозира точно инфекциите, но все пак не може да информира решенията за ресурсите, ако не оцени колко пациенти се нуждаят от грижи в отделение или интензивно лечение. Следователно H отделението представлява пациенти, нуждаещи се от общи болнични грижи, докато отделението за интензивно лечение представлява пациенти, нуждаещи се от ресурси за критични грижи, като специализиран персонал, мониторинг, вентилатори и по-висока интензивност на грижите.

2.5.3 Справяне с несигурността на епидемиологичните параметри

Наборът от неопределености може да бъде калибриран по няколко начина. Ако са налични достатъчно данни, доверителните интервали от оценката на параметрите могат да определят долни и горни граници. Ако данните са ограничени, експертно дефинираните сценарии могат да посочат песимистични, базови и оптимистични диапазони на параметрите. Историческата променливост в различните вълни или региони също може да информира за допустимите граници. Важното методологично изискване е границите на неопределеността да бъдат документирани и интерпретирани като част от допусканията на модела.

2.6 Моделиране на здравните системи и ресурсите

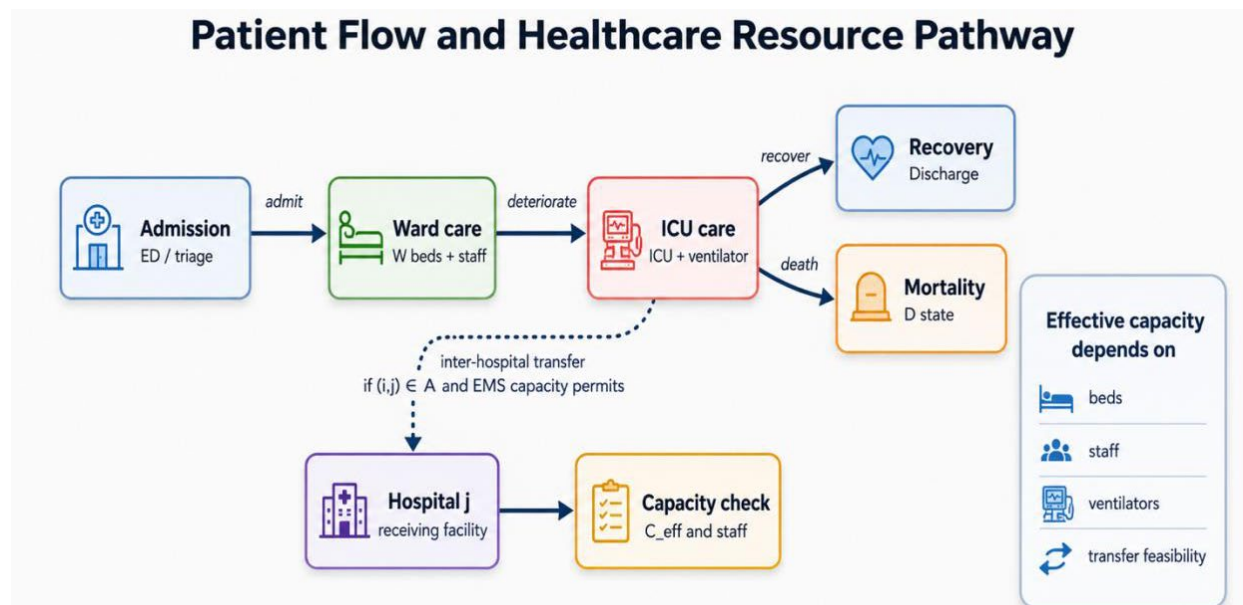
Докато епидемиологичният компонент оценява пространствено-времето търсене, генерирано от пандемичното предаване, оперативната осъществимост зависи от структурата на предлагането в здравната система. Капацитетът на здравните грижи по време на пандемия не може да бъде представен точно като статичен брой легла. Едно легло е оперативно използваемо само когато е подкрепено от подходящ персонал, оборудване, снабдяване с кислород, клинични протоколи и осъществимост на трансфер. Следователно капацитетът трябва да се моделира като динамична и многоизмерна конструкция [6].

Слоят за моделиране на здравната система и ресурсите превръща епидемиологичното търсене в оперативен натиск. Той определя регионалната болнична мрежа, определя количествено ефективния капацитет на отделенията и интензивните отделения, моделира потоците от пациенти по пътищата на грижите, включва ограниченията на човешките ресурси и определя мерките за използване и балансиране на натоварването. Тези елементи осигуряват структурата на осъществимост за оптимизационния модел в раздел 2.7.

2.6.1 Болнична мрежа и ефективен капацитет

Мрежовото представяне е необходимо, тъй като капацитетът на здравеопазването е географски и институционално разпределен. По време на пандемия претоварването рядко е равномерно във всички заведения. Някои болници може да се сблъскат с изключителен натиск в интензивните отделения, докато други запазват резервен капацитет. Моделирането на системата като $G = (I, A)$ позволява на рамката да оцени дали прехвърлянето на пациенти или преразпределението на ресурсите могат да намалят локализираното претоварване, без да създават нови затруднения другаде.

2.6.2 Ограничения на потока от пациенти и прехвърлянето им



Фигура 2.3. Пътят на движение на пациентите и здравните ресурси, използван за представяне на отделение, интензивно отделение, прехвърляне, възстановяване и недостиг.

Запазването на потока от пациенти е механизмът, който предотвратява изкуственото създаване или премахване на пациенти от модела. Преброяването в следващия период трябва да е равно на текущото преброяване плюс приема и входящите премествания, минус изходящите премествания, изписванията, смъртните случаи и вътрешните отливи, като се добавят вътрешните входящи постъпления, където е уместно. Тази счетоводна структура е от съществено значение, когато моделът се използва в продължение на няколко периода, тъй като малки несъответствия могат да се натрупат и да доведат до нереалистични състояния на капацитета [6].

2.6.3 Работна сила и капацитет при превишаване на капацитета

Параметърът за изчерпване на персонала може да представлява множество оперативни натоварвания, включително инфекции сред здравните работници, изисквания за карантина, умора, прегаряне или пренасочване към други отдели. Тъй като тези натоварвания могат да варират в различните лечебни заведения, параметърът се индексира по лечебно заведение и време. Това позволява на модела да представя локализирани кризи с работната сила, вместо да приема еднаква наличност на персонал в цялата мрежа.

2.6.4 Използване и балансиране на натоварването

Използването не е включено само като описателен показател; то влияе върху качеството и безопасността на здравната система. Високото използване може да намали гъвкавостта, да увеличи времето за чакане, да ограничи способността за реагиране при внезапни хоспитализации и да засили натиска върху персонала. Мониторингът на използването по заведение и ниво на грижа позволява на рамката да открие къде е концентриран рискът от претоварване.

2.6.5 Обобщение и връзка към оптимизацията

Слоят за моделиране на ресурсите в здравеопазването установява структурата на оперативната осъществимост на IHDSF. Той свързва прогнозите за епидемиологичното търсене с ефективния капацитет, запазването на потока от пациенти, осъществимостта на трансфера, ограниченията в персонала и изискванията за балансиране на натоварването. Тези елементи осигуряват ограниченията и компонентите на целевата функция, използвани в устойчивия многоцелеви оптимизационен модел, разработен в раздел 2.7 [6].

2.7 Стратегии за оптимизация и алгоритмичен дизайн

Епидемиологичният модел прогнозира търсенето, а ресурсният модел определя оперативната осъществимост. Централната предписателна задача е да се определи кои решения за разпределение трябва да се прилагат, когато здравната система е изправена пред несигурно търсене, оскъдни ресурси и противоречиви клинични и логистични цели. Следователно, компонентът за оптимизация е предписателният двигател на IHDSF. Той трансформира прогнозите за търсенето и ограниченията на капацитета в решения за разпределение, трансфер, увеличаване на капацитета и персонал [5], [6], [8].

Разпределението на здравните ресурси по време на пандемия е формулирано като стабилна многоцелева оптимизационна задача, тъй като нито един индикатор не обхваща предизвикателството при вземането на решения. Стратегия, която минимизира трансферите, може да претовари някои болници. Стратегия, която балансира натоварването агресивно, може да увеличи транспортното натоварване. Стратегия, която минимизира незадоволеното търсене, може да изисква спешни резервни ресурси. Следователно моделът за оптимизация трябва да представлява компромиси между клиничната защита, регионалното балансиране на натоварването, логистичната осъществимост и оперативната устойчивост.

2.7.1 Променливи на решенията и осъществимо пространство

Възможното пространство за вземане на решения не е статично. То може да се променя с промяната на капацитета, наличността на персонал, маршрутите за прехвърляне или институционалните правила. Например, ако дадено заведение загуби персонал в интензивното отделение поради отсъствия, ефективният капацитет и възможното разпределение трябва да бъдат актуализирани. Ако капацитетът на Спешна медицинска помощ намалее, възможното количество прехвърляне трябва да бъде намалено. Работният процес с плавен хоризонт в раздел 2.9 е проектиран да се актуализира с появата на нова оперативна информация [6].

2.7.2 Формулиране на многоцелева оптимизация

Нормализирането на целите заслужава специално внимание, тъй като четирите компонента имат различни физически значения и величини. Незадоволеното търсене може да се измери при пациенти, дисбалансът на натоварването - при отклонения в използването, трансферите – при движения на пациенти, претеглени по разстояние, и пиковото използване при

активирани спешни ресурси. Без нормализиране, целта с най-голям числен мащаб би могла да доминира решението, дори ако вземащите решения не са предвидили този приоритет. Следователно нормализираните цели правят теглата интерпретируеми като предпочитани параметри, а не като случайни преобразувания на единици [8].

2.7.3 Надежден аналог при епидемиологична несигурност

Надеждният аналог е особено полезен в ранните фази на епидемията, когато оценките на параметрите са нестабилни и търсенето в болниците може да се увеличи бързо. При такива условия, детерминистично решение, базирано на единична прогноза, може да доведе до крехки планове за разпределение. Надеждната формулировка вместо това оценява решенията-кандидати спрямо неблагоприятни, но правдоподобни условия, намалявайки вероятността дадена политика да стане неприложима скоро след прилагането ѝ [7].

2.7.4 Основни ограничения на оптимизационния модел

Ограничението на капацитета предотвратява превишаването на ефективния капацитет на третирувания преброител. В реални системи кризисните условия могат да доведат до грижи извън нормалния капацитет, но такова претоварване не трябва да се скрие в модела. Ако е разрешено препълване при спешни случаи, то трябва да бъде представено изрично чрез санкции за пиков капацитет, недостиг или праг на безопасност, а не чрез тихо нарушаване на ограниченията на капацитета.

2.7.5 Хибриден подход за оптимизация

Хибридният подход отразява практическото напрежение между математическата строгост и полезността в реално време. Точната оптимизация е желателна, защото осигурява силни гаранции за определената формулировка, но вземането на решения при кризи може да изисква решения в рамките на ограничено време. Когато проблемът стане твърде голям за точни методи, евристични или симевристични процедури могат да доведат до висококачествени решения, които са оперативно полезни дори без пълни доказателства за оптималност.

2.8 Интегриране на симулация и оптимизация

Моделът за оптимизация, разработен в раздел 2.7, генерира кандидати за политики за разпределение на ресурси, трансфер и свръхпроизводство. Въпреки това, една математически осъществима политика може все още да се представя слабо при стохастични условия на потока от пациенти. Здравните системи по време на пандемия са засегнати от случайни пристигания на пациенти, несигурна клинична прогресия, променлива продължителност на престоя, забавяния на трансфера, отсъствия на персонала и претоварване на интензивните отделения. Поради тази причина IHDSF включва валидационен слой, базиран на симулация [5], [6], [10].

Симулацията на дискретни събития (DES) се използва за оценка на кандидат-политики при стохастични оперативни условия. DES слойът представлява пристиганията на пациенти,

приеманията, преместванията между отделения и интензивни отделения, прехвърлянията, изписванията, смъртните случаи, опашките и конкуренцията за ресурси. Целта му не е да замести оптимизационния модел, а да тества дали оптимизирани политики остават оперативно осъществими, когато се въведе променливост. Терминът „подобен на цифров близък“ се използва предпазливо: симулацията е оперативно представяне на здравната мрежа, достатъчно за стрес-тестове, а не пълно възпроизвеждане на всеки микроскопичен клиничен детайл [10].

2.8.1 Слой за симулация на дискретни събития

DES слой е подходящ, защото здравните операции са управлявани от събития. Приемане, разпределение на легла, влошаване, преместване в интензивно отделение, възстановяване, изписване, смърт и преместване между заведения се случват в определени моменти и променят състоянието на системата. Моделирането на тези събития изрично позволява на рамката да оцени времената за чакане, опашките и моделите на задръствания, които е трудно да се уловят в детерминистичен оптимизационен модел [10].

2.8.2 Пътища на пациентите и показатели за ефективност

Пациент може да постъпи в системата чрез спешно приемане, да бъде назначен в отделение за грижи, да се влоши в интензивно отделение, да се възстанови и да бъде изписан, да почине или да бъде преместен в друго заведение. Тези пътища съответстват на епидемиологичните и ресурсните компоненти, дефинирани по-рано, но DES добавя стохастично време и конкуренция за ресурси. При всяко събитие се проверява осъществимостта на ресурсите. Ако необходимият ресурс не е наличен, пациентът влиза в състояние на опашка или недостиг, което позволява на модела да оцени времето за чакане и риска от претоварване.

2.8.3 Свързване на DES с модула за оптимизация

Връзката между симулация и оптимизация е двупосочна. Оптимизационният модел генерира кандидат-политика u^* , докато DES слой оценява тази политика при стохастични условия на потока от пациенти. За всяка репликация се взема извадка от стохастичен сценарий, така че една и съща оптимизирана политика да може да бъде оценена спрямо множество реализации на пристигане на пациенти, забавяне на трансфера и време за обслужване [10].

2.8.4 Прагове за безопасност, обратна връзка и валидиране

Праговете за безопасност превръщат симулационните данни в правила за вземане на решения. В слоя DES, правилото за безопасност на интензивното отделение може да бъде изразено като максимално приемлива вероятност времето за чакане, използването или незадоволеното търсене на интензивни грижи да надвишат предварително определен праг [10].

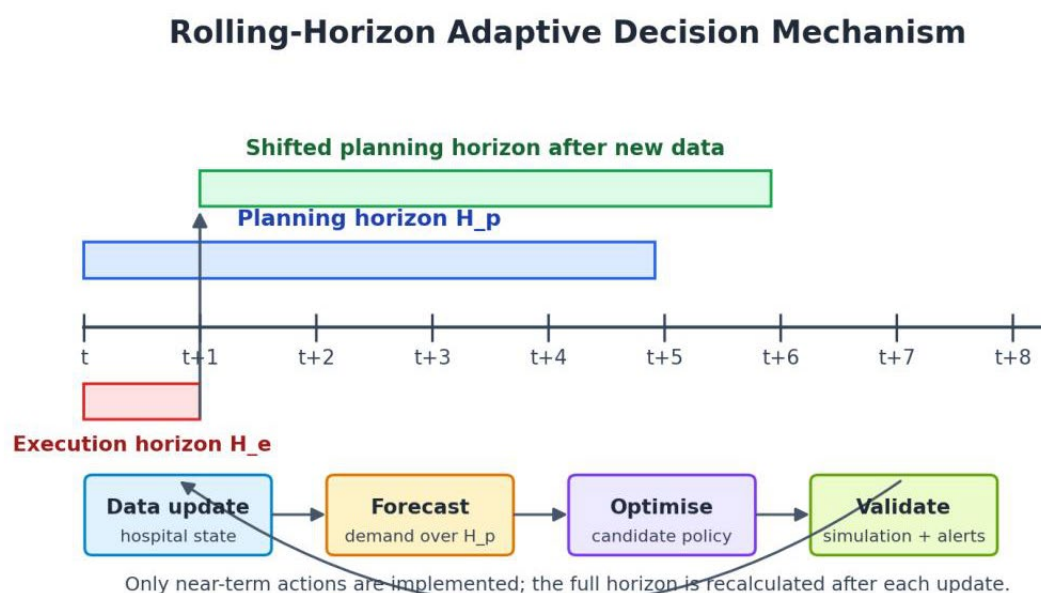
2.9 Работен процес за подпомагане на вземането на решения и адаптивна логика

ИHDSF е проектирана като система за подпомагане на вземането на решения с подвижен хоризонт. При всяко актуализиране t се събират нови епидемиологични, болнични, персонални и логистични данни, които се трансформират в актуализирана оценка на състоянието на системата. След това моделът прекалибрира параметрите, генерира прогнози за търсенето, решава проблема с оптимизацията, валидира решенията на кандидатите чрез симулация и предоставя препоръки за преглед от човек. Тази циклична структура е необходима, защото информацията за пандемията бързо остарява.

2.9.1 Процес на подпомагане на вземането на решения в реално време

Работният процес е проектиран да бъде съвместим с болнични информационни системи, платформи за управление на легла, данни за наблюдение на общественото здраве, досиета за персонал и регионални бази данни за координация. Съвместимостта не означава, че моделът е автоматично интегриран с електронните здравни досиета във всеки емпиричен контекст. Действителното ниво на интеграция зависи от наличната инфраструктура за данни и институционалните разрешения.

2.9.2 Адаптивен механизъм с плъзгащ се хоризонт



Фигура 2.4. Адаптивен механизъм за вземане на решения с подвижен хоризонт.

Разграничението между хоризонт на планиране и хоризонт на изпълнение е от основно значение. Хоризонтът на планиране позволява на модела да предвижда бъдещи пикове на търсенето, докато хоризонтът на изпълнение пречи на системата да се ангажира с дълъг план, основан на несигурни прогнози. Например, един модел може да планира за 14 дни, но да реализира само следващите 24 или 48 часа трансфери и решения за персонал.

2.9.3 Управление „човек в цикъла“ и резултати от таблото за управление

Човешкият преглед е особено важен, тъй като целите за оптимизация не могат да кодират напълно всички етични и клинични съображения. Например, прехвърлянето може да е математически ефективно, но неподходящо за клинично нестабилен пациент. Препоръката за персонал може да е осъществима като цяло, но неприемлива поради умора или законови ограничения на работното време. Управлението „човек в цикъла“ гарантира, че резултатите от модела се интерпретират в реалния институционален контекст.

2.9.4 Алгоритмично описание на адаптивния работен процес

Алгоритъмът може да бъде реализиран с различни нива на автоматизация. В изследователски прототип няколко стъпки могат да се извършват ръчно, като например подготовка на данни, калибриране на параметри и преглед на резултатите от симулацията. При оперативно внедряване тези стъпки могат да бъдат интегрирани с табла за управление и болнични информационни системи. Методологичният принос на Глава 2 не зависи от пълната автоматизация; той зависи от структурираната последователност на актуализиране, прогнозиране, оптимизация, валидиране на симулацията и човешки преглед.

2.10 Резюме на главата

В тази глава е разработена предложената интегрирана хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения за оптимизация на здравната система по време на пандемия. Рамката интегрира епидемиологично прогнозиране, моделиране на здравните ресурси, стабилна многоцелева оптимизация, симулация на дискретни събития и адаптивна обратна връзка с подвижен хоризонт в единна методологична структура [5], [7], [8], [10].

Главата първо формулира управлението на здравеопазването по време на пандемия като динамичен проблем за подпомагане на вземането на решения в условия на несигурност. Системата беше представена чрез зависими от времето епидемиологични и оперативни състояния, променливи на решенията, множества от несигурност, прогнози за търсене, ефективен капацитет, променливи на недостиг, трансфери на пациенти и ограничения за осъществимост. Обхватът на модела беше определен около регионалната координация на здравеопазването, докато по-широките политики в областта на общественото здравеопазване бяха третирани като екзогенни сценарийни входни данни.

Епидемиологичният компонент е разработен с помощта на разширена SEIR-H-ICU-D структура, която свързва динамиката на инфекциите с търсенето в отделенията и интензивните отделения. Този модел осигурява прогнозния слой на рамката, като трансформира траекториите на инфекциите в сигнали за оперативно търсене на здравни грижи. Несигурността в епидемиологичните параметри е представена чрез ограничени множества от несигурности, което позволява по-късни решения за оптимизация да бъдат оценени при правдоподобни сценарии.

Слоят за моделиране на здравните ресурси представляваше болничната мрежа, капацитета на отделенията и интензивните отделения, наличността на персонал, вентилаторите,

осъществимостта на трансфер, потоците от пациенти и изискванията за балансиране на натоварването. Ефективният капацитет беше дефиниран като количество с ограничен капацитет, а не като номинален брой легла, което гарантира, че моделът отразява оперативната осъществимост. Променливите за недостиг, трансфер, персонал и използване осигуряват директния мост между прогнозирането на търсенето и оптимизацията.

Компонентът за оптимизация формулира управлението на здравеопазването по време на пандемия като стабилен многоцелевен проблем за вземане на решения. Целта балансира незадоволеното търсене, риска, свързан със смъртността, тежестта на трансфера, дисбаланса при използване и използването на ресурси в резултат на пик. Стабилният компонент отчита несигурността в епидемиологичните и оперативните параметри, докато хибридният подход за решение комбинира точна оптимизация с евристично или симулационно подпомагано търсене, когато е необходимо.

ГЛАВА 3: СЪБИРАНЕ НА ЕМПИРИЧНИ ДАННИ, ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДИЗАЙН

3.1 Казус за COVID-19 в Косово и източници на данни

Таблица 3.1. Набор от данни за COVID-19 и болничен капацитет на ниво община в Косово, използван за подготовката на експеримента

Община	Население	Легла	Януарски случаи	Случаи през февруари	Кумулативни случаи
Прищина	210 000	800	1200	1500	2700
Призрен	178 000	600	800	900	1700
Пея	130 000	400	500	600	1100
Гякова	94 000	300	400	450	850
Митровица	85 000	250	300	350	650
Феризай	110 000	350	500	550	1050
Гнилан	100 000	300	450	500	950

Косово е използвано в тази дисертация като емпиричен казус в здравеопазването за оценка на стратегии за прогнозиране, оптимизация и симулация, свързани с пандемията. Казусът е уместен, тъй като Косово представлява здравна среда с ограничени ресурси, в която пандемичният натиск, болничният капацитет и регионалната наличност на услуги могат да се различават значително в различните общини. Тези условия правят страната подходяща среда за изследване как моделите за подпомагане на вземането на решения, основани на данни, могат да подпомогнат планирането на здравеопазването по време на пандемични извънредни ситуации.

Емпиричният фокус на тази глава е изграждането на структуриран набор от данни, който може да подпомогне по-късните изчислителни модули на дисертацията. Наборът от данни

комбинираща епидемиологична, демографска и информация за капацитета на здравеопазването на общинско ниво. Епидемиологичният компонент обхваща докладваните случаи на COVID-19, докато демографският и капацитетният компоненти предоставят данни за размера на населението и наличността на болнични легла. Тези променливи са необходими, защото дисертацията не анализира само инфекциозния натиск; тя оценява как инфекциозният натиск взаимодейства с ограничените ресурси за здравеопазване.

3.2 Включване на общините, пълнота и надеждност на данните

Този раздел определя как наблюденията на ниво община, описани в Раздел 3.1, се избират, проверяват и подготвят за използване в експериментите на дисертацията. Целта на раздела не е да се повтори пълната таблица с набор от данни, а да се установи прозрачна логика на включване, която прави възпроизводими по-късните резултати от прогнозирането, оптимизацията и симулацията. Едни и същи записи на ниво община трябва да могат да се използват в модула за прогнозиране SEIR-kNN, модела за разпределение MILP и симулацията на болничните операции DES. Поради тази причина пълнотата на данните се третира като предпоставка за експериментална съгласуваност, а не като отделен изчислителен резултат.

Емпиричната единица за анализ е записът на ниво община. Всеки запис представлява една община в Косово, за която необходимите демографски, епидемиологични и здравно-капацитетни променливи са налични в последователна таблична форма. Крайният експериментален набор от данни съдържа седемте пълни записа за общини, изброени в Таблица 3.1: Прищина, Призрен, Пея, Гякова, Митровица, Феризай и Гнилан. Тези наблюдения формират общата входна база за получените индикатори, процедурите за нормализиране, стъпките за параметризация и дефинициите на сценарии, разработени в останалите раздели на тази глава.

3.2.1 Логика за приобщаване на общините

Процедурата за включване на общини следва консервативен дизайн. Целта е да се избегнат неподкрепени числени твърдения и да се гарантира, че всеки ред, използван в по-късни изчисления, има една и съща структура. Община е отговаряла на условията за включване, когато е отговаряла на четири условия: идентификаторът на общината е уникален, стойността на населението е налична, стойността на болничните легла е налична и са налични стойности за случаите както за януари, така и за февруари 2021 г. Тези условия са минимални, но достатъчни за задачите по подготовка на данните, изисквани в тази дисертация.

3.2.2 Изисквания за пълнота на данните

Пълнотата на данните се оценява на ниво задължителни променливи, необходими за експерименталния работен процес. Необходимите променливи съответстват на минималната информация, необходима за свързване на трите аналитични слоя на дисертацията: епидемиологично прогнозиране, оптимизация, съобразена с капацитета, и оперативна

симулация. Променливата за популацията подпомага нормализирането и демографското сравнение. Докладваният брой случаи предоставя емпиричния сигнал за инфекциозен натиск. Капацитетът на болничните легла осигурява базовото ограничение на ресурсите за здравеопазване. Заедно тези променливи правят възможно трансформирането на казуса Косово в структуриран експериментален набор от данни.

3.2.3 Контрол на надеждността на данните и вътрешната съгласуваност

Контролите за надеждност, прилагани в този раздел, са вътрешни контроли за съгласуваност. Те не твърдят, че епидемиологичното докладване е освободено от ограниченията, често срещани по време на извънредни ситуации в общественото здраве. Вместо това, те гарантират, че наборът от данни, използван за моделиране, е съгласуван, възпроизводим и подходящ за изчислителните процедури, разработени в тази дисертация.

3.2.4 Третиране на непълни записи

Непълните записи не се използват в основната количествена матрица. Това решение се взема преди изпълнението на модела и се прилага последователно във всички последващи изчисления. Целта е да се избегне смесването на пълни числени наблюдения с частично документиран общини. Такова смесване би било проблематично, тъй като модулите за прогнозиране, оптимизация и симулация изискват структурирани входни данни с едни и същи дефиниции на променливи за всяко наблюдение.

3.2.5 Последици за експерименталния дизайн

Правилата за включване и пълнота, дефинирани в този раздел, пряко подкрепят експерименталния дизайн на дисертацията. Те гарантират, че едни и същи емпирични наблюдения могат да бъдат предадени от подготовката на данните до параметризацията и след това към изчислителните модели. Тази съгласуваност е особено важна, защото дисертацията оценява интегриран работен процес за прогнозиране-оптимизация-симулация, а не един изолиран модел.

3.3 Производни епидемиологични и здравно-капацитетни показатели

Наборът от данни на ниво община, дефиниран в раздели 3.1 и 3.2, предоставя суровата емпирична основа за експерименталния дизайн. Суровите данни за населението, броят на докладваните случаи и стойностите на болничните легла обаче не са пряко сравними между общините, тъй като общините се различават по демографски размер и структура на капацитета на здравеопазването. Поради тази причина, преди да бъдат параметризирани модулите за прогнозиране, оптимизация и симулация, беше конструиран набор от производни епидемиологични и показатели за капацитет на здравеопазването.

Целта на този раздел е да трансформира проверения набор от данни на ниво община в Косово в сравними аналитични променливи. Индикаторите не са предназначени да създадат отделен модел за категорично клинично групиране. Вместо това, те предоставят възпроизводими

емпирични сигнали, които свързват тежестта на инфекциите, наличността на болничен капацитет и краткосрочния ръст на случаите. Тези сигнали по-късно се използват за подпомагане на изграждането на характеристиките на SEIR-kNN, подготовката на MILP търсене-капацитет и дизайна на DES сценарии.

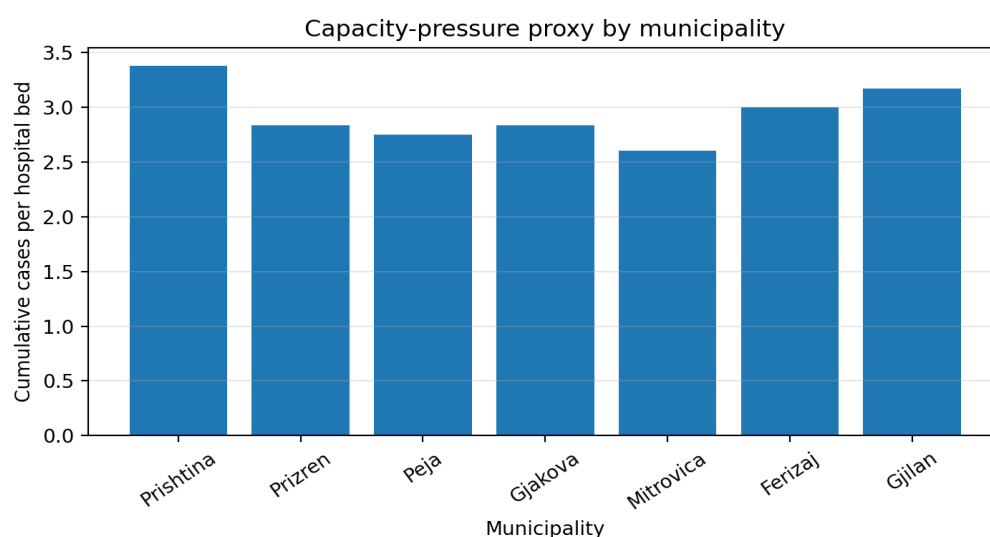
3.3.1 Конструкция на индикатора и аналитична роля

За основната глава бяха запазени четири показателя: кумулативни случаи на 100 000 жители, болнични легла на 100 000 жители, приблизителен показател за натоварване от капацитета и темп на растеж от януари до февруари. Тези показатели бяха избрани, защото са директно получени от пълния набор от данни и защото подпомагат работния процес на дисертацията, без да въвеждат неподдържани категориални прагове.

3.3.2 Профил на индикаторите на общинско ниво

Таблица 3.2. Производни епидемиологични и здравни показатели за капацитет

Община	Случаи/100 хиляди	Легла/100 000	Прокси на налягането	Темпът на растеж
Прищина	1285.71	380,95	3.38	25,00%
Призрен	955.06	337.08	2.83	12,50%
Пея	846.15	307.69	2.75	20,00%
Гякова	904.26	319.15	2.83	12,50%
Митровица	764.71	294.12	2.60	16,67%
Феризай	954.55	318.18	3.00	10,00%
Гнилан	950,00	300,00	3.17	11,11%



Фигура 3.1. Показател за натиск върху капацитета по общини.

Профилът на индикаторите показва, че натискът върху здравеопазването не се обяснява само с абсолютния брой случаи. Прищина и Гилян показаха най-високи показатели за натиск, което предполага по-силен стрес върху здравеопазването спрямо наличния капацитет. Феризай също показва съответен натиск, когато кумулативните случаи се интерпретират

спрямо наличната база болнични легла. Това подкрепя използването на показатели, съобразени с капацитета, вместо да се разчита само на сурови докладвани случаи.

3.3.3 Роля на индикаторите в експерименталния дизайн

Получените индикатори осигуряват мост между подготовката на емпиричните данни и изчислителните експерименти. В компонента SEIR-kNN, стандартизираните епидемиологични и здравно-капацитетни променливи подпомагат изграждането на характеристики на общинско ниво и адаптирането на параметрите. В компонента MILP, индикаторите помагат за подготовката на входните данни за търсенето и капацитета за анализ на разпределението. В компонента DES те подпомагат проектирането на оперативни сценарии, при които се оценява натискът на потока от пациенти при ограничени здравни ресурси.

3.4 Предварителна обработка на данни, нормализиране и подготовка на входните данни в MATLAB

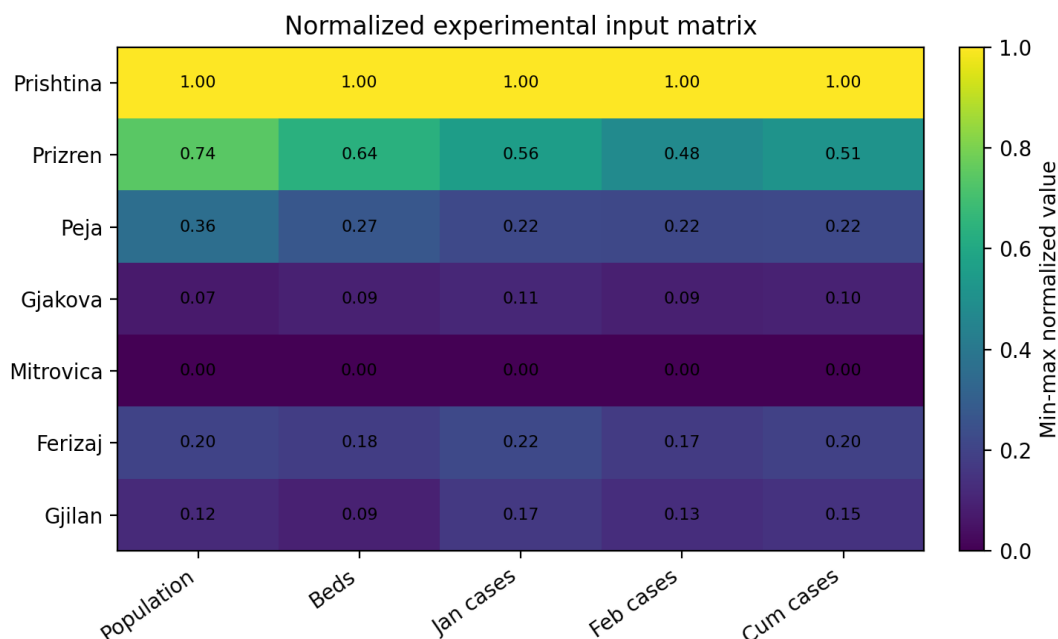
В предходните раздели са дефинирани казусът за здравеопазване, свързан с COVID-19 в Косово, логиката за включване на общините и получените показатели за епидемиологичния и здравния капацитет. Следващата стъпка е да се преобразуват тези емпирични данни в структуриран изчислителен входен слой. Следователно този раздел описва как наборът от данни е бил почистен, нормализиран, обобщен и подготвен като вход в MATLAB за компонентите SEIR-kNN, MILP и DES на дисертацията.

Този раздел е умишлено позициониран в Глава 3, защото предварителната обработка и подготовката на входната матрица са част от слоя за емпиричен дизайн на данните, а не от главата за резултатите. Числовите резултати, получени от тези подготвени входни данни, са представени по-късно в Глава 4. Ролята на Раздел 3.4 е да гарантира, че изчислителните експерименти се основават на един и същ проверен набор от данни и че всеки модул получава последователни входни данни.

3.4.1 Почистване на данни и изграждане на функции

Почистването на данните беше извършено след стъпката за включване на общините, описана в раздел 3.2. Тъй като в експерименталния набор от данни се запазват само пълни записи за общините, в основния анализ не се прилага импутация. Този избор избягва въвеждането на синтетични стойности в малък набор от данни на ниво община и гарантира, че входните данни за прогнозиране, разпределение и симулация остават проследими до наблюдаваните данни.

3.4.2 Нормализация и описателна статистика



Фигура 3.2. Нормализирана експериментална входна матрица, използвана за адаптация на параметрите на SEIR-kNN.

Нормализацията беше необходима, тъй като променливите в набора от данни се измерват в различни числени скали. Стойностите на популацията са значително по-големи от месечния брой случаи и броя на болничните легла, докато производните променливи, като например натиск върху капацитета и темп на растеж, са относителни мерки. Ако всички променливи се използват без стандартизация по метод, базиран на разстояние, променливите с по-голям мащаб биха доминирали в изчисленията за сходство и биха намалили ефекта на показателите за капацитет на здравеопазването и епидемиологичен натиск.

3.4.3 Подготовка на входна матрица в MATLAB

След почистване, конструиране на характеристики и нормализиране, наборът от данни беше организиран във входни структури на MATLAB, изисквани от експериментите в дисертацията. Модулът SEIR-kNN изисква нормализирана матрица от характеристики на общината. Модулът MILP изисква входни данни за търсене и капацитет, заедно със структури, свързани с разпределението. Модулът DES изисква оперативни параметри и допускания за сценарии, получени от същия предварително обработен слой данни.

3.5 Параметризация на SEIR-kNN, MILP и DES експерименти

След като наборът от данни на ниво община в Косово бъде проверен, трансформиран в производни епидемиологични и здравни показатели за капацитет и стандартизиран в готови за MATLAB входни структури, следващата стъпка е да се дефинира експерименталната параметризация на трите изчислителни модула, използвани в дисертацията: прогнозиране SEIR-kNN, разпределение на болниците, базирано на MILP, и симулация на болнични операции, базирана на DES. Целта на този раздел е да се определят емпиричните входни

данни, диапазоните на параметрите, допусканията за сценарии и междумодулните връзки, необходими за възпроизводимо експериментиране.

Този раздел е написан като част от Глава 3, която функционира като глава за данни, параметризация и експериментален дизайн. Той не е раздел с резултати. Следователно, той не докладва грешки при прогнозиране, матрици за разпределение, сравнения на разходите за трансфер, намаляване на времето за чакане, подобрения в пропускателната способност, р-стойности, доверителни интервали или интегрирани резултати от ключови показатели за ефективност (KPI). Тези числени резултати принадлежат към Глава 4, където се анализират изчислителните резултати.

3.5.1 SEIR-kNN експериментална параметризация

Таблица 3.3. SEIR-kNN експериментален профил на параметризация

Група параметри	Обстановка	Експериментална роля
Община	Седем пълни общини	Последователни записи за прогнозиране
Исторически период на въвеждане	Януари-февруари 2021 г.	Изграждане и адаптиране на характеристики
Хоризонт на прогнозиране	60 дни / март-април 2021 г.	Краткосрочна оценка на търсенето
Бета	1,5-2,2 без машаб; около 0,180-0,230 ефективна дневна норма	Интензитет на предаване
Сигма	0,18-0,22	Преход от изложеност към заразяване
Гама	0,09-0,14	Динамика на възстановяване/премахване
kNN параметър	k = 3, 5, 7, 9	Баланс на чувствителност и адаптация
Преобразуване на търсенето	15% от изходното ниво; 30% стрес; интензивно отделение 12% от изискваното ниво на стрес	Сигнали за търсене в болниците и интензивните отделения

Модулът SEIR-kNN осигурява прогнозния слой на дисертацията. Неговата роля е да трансформира подготвения набор от данни на ниво община в Косово в краткосрочни сигнали за инфекция и търсене, които по-късно могат да бъдат използвани от модулите за разпределение и симулация. Прогнозният експеримент използва формулировката на SEIR, представена в Глава 2, с адаптация на параметрите, специфични за общината; следователно уравненията на SEIR не се повтарят в този раздел.

3.5.2 Експериментална параметризация на MILP

Таблица 3.4. Профил на експериментална параметризация на MILP

Група параметри	Обстановка	Експериментална роля
Болнични възли	H1-Прищина/QKUK; H2-Призрен; H3-Реја; H4-Гилан/Феризай; H5-Митровица/Джакова	Намалена мрежа за разпределение
Търсене с достатъчен капацитет	[80, 20, 10, 50, 60]	Тестова координация, когато общият капацитет е достатъчен
Достатъчен капацитет	[50, 40, 30, 40, 60]	Профил на капацитета за получаване
Стрес при пиково търсене	Търсене = 1500; капацитет = 1100	Диагностика на осъществимостта и недостига
Варианти на полици	Няма координация; алчен; MILP с местен приоритет; MILP с глобални разходи	Сравнение на логиката на разпределение
Незадоволена променлива на търсенето	Активирано при недостиг на капацитет	Предотвратява фалшиви искове за пълно покритие

Модулът MILP осигурява предписателния слой за разпределение на дисертацията. Неговата цел е да трансформира прогнозираното търсене в болниците в структурирани сценарии за разпределение на пациентите и координация между болниците. Пълната математическа формулировка на MILP модела не се повтаря в този раздел. Вместо това, този подраздел определя експерименталните входни данни, необходими за изпълнение на сценариите за разпределение: интерпретация на болничния възел, вектори на търсенето, вектори на капацитета, входни данни за трансферните разходи, варианти на политиките, променливи на недостига и настройки за чувствителност.

3.5.3 Експериментална параметризация на DES

Таблица 3.5. Профил на експериментална параметризация на DES

Група параметри	Обстановка	Оперативна роля
Процес на пристигане	Средно 180 пациенти/ден	Интензитет на притока на пациенти
Класове на пациентите	Леко, умерено, тежко	Триаж и маршрутизиране на пътеките
Базов капацитет на интензивното отделение	15 легла в интензивно отделение	Ограничен капацитет за интензивно лечение
Уорд ЛОС	3-5 дни	Продължителност на службата в района
Интензивно отделение Лос	7-10 дни	Заетост на интензивните отделения

Персонал	8 лекари и 12 медицински сестри на смяна	Предположение за пречките в услугата
Сценарии	Базово ниво; Препълване на интензивното отделение; оптимизирана конфигурация	Оперативни стрес тестове
Ключови показатели за ефективност (KPI)	Използване на интензивното отделение, време на чакане, пропускателна способност, незадоволено търсене в интензивното отделение	Оценка на изпълнението

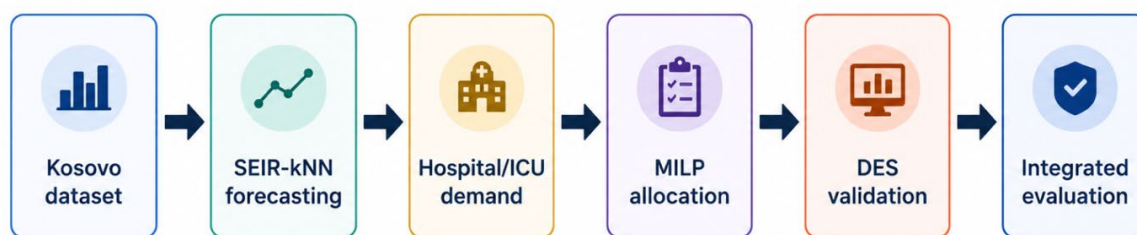
Модулът DES осигурява оперативния симулационен слой на дисертацията. Докато SEIR-kNN генерира сигнали за търсене, а MILP предписва решения за разпределение, DES оценява дали тези решения остават оперативно осъществими, когато пациентите пристигат стохастично, ресурсите на интензивното отделение се претоварват, образуват се опашки и капацитетът на персонала ограничава пропускателната способност. В Глава 3 компонентът DES е параметризиран като експериментален дизайн; действителните резултати от сценария са докладвани в Глава 4.

3.6 Експериментален дизайн, сценарии и настройка на възпроизводимостта

Раздели 3.1-3.5 установяват емпиричния и изчислителен подготвителен слой на дисертацията. Дефиниран е наборът от данни на ниво община в Косово, избрани са пълни записи, изведени са епидемиологични и здравни показатели за капацитет, завършена е предварителната обработка и нормализиране, а модулите SEIR-kNN, MILP и DES са параметризирани. Целта на настоящия раздел е да свърже тези елементи в един съгласуван експериментален дизайн.

Този раздел не представя изчислителни резултати. Вместо това, той определя как подготвеният набор от данни, настройките на параметрите и допусканията за сценарии се предават през интегрирания работен процес за прогнозиране-оптимизация-симулация. Числовите резултати, генерирани от този работен процес, включително точност на прогнозиране, матрици за разпределение, сравнения на разходите за трансфер, намаляване на времето за чакане, промени в производителността, показатели за незадоволено търсене и интегрирани резултати от ключови показатели за ефективност (KPI), са представени в Глава 4.

3.6.1 Интегриран експериментален работен процес



Фигура 3.3. Интегриран експериментален работен процес за рамката за дисертация SEIR-kNN-MILP-DES.

Интегрираният експериментален работен процес свързва емпиричния набор от данни с трите изчислителни модула, използвани в дисертацията. Работният процес започва с верифицирания набор от данни на ниво община в Косово и завършва с интегрираната оценка на резултатите от прогнозирането, разпределението и симулацията в Глава 4. Тази структура избягва третирането на SEIR-kNN, MILP и DES като изолирани модели и вместо това ги организира като свързани компоненти за подпомагане на вземането на решения.

3.6.2 Проектиране на сценарии и настройка на възпроизводимостта

Дизайнът на сценариите определя как подготвените данни и настройки на параметрите се използват за оценка на предложената рамка за подкрепа на вземането на решения. Управлението на здравеопазването по време на пандемия не може да бъде оценено само при едно базово условие. Търсенето може да се увеличи, ефективният капацитет може да намалее, натискът в интензивното отделение може да надвиши наличните ресурси, а промените в персонала могат да променят оперативните показатели. Следователно, експерименталният дизайн включва базов, стрес, оптимизиран и ориентиран към чувствителност сценарий.

3.7 Резюме на главата

Тази глава представи емпиричното събиране на данни, параметризацията и експериментално-дизайнерската основа за дисертацията. Целта ѝ беше да подготви казуса на здравеопазването в Косово, свързан с COVID-19, за изчислителния анализ, описан в Глава 4. Главата не докладва окончателни резултати от прогнозиране, разпределение, симулация или интегрирани ключови показатели за ефективност (KPI); вместо това, тя дефинира данните, индикаторите, логиката за предварителна обработка, настройките на параметрите, сценариите и структурата за възпроизводимост, необходими за генериране на тези резултати.

Раздел 3.1 въведе Косово като емпирично проучване на здравния случай и определи набора от данни на ниво община, използван за експериментална подготовка. Наборът от данни комбинира демографски, епидемиологични и променливи за здравния капацитет, включително население, болнични легла, случаи през януари 2021 г., случаи през февруари 2021 г. и кумулативни случаи за периода януари-февруари. Тези променливи осигуряват емпиричната основа за по-късните модули SEIR-kNN, MILP и DES.

Раздел 3.2 определя логиката за включване на общините, изискванията за пълнота на данните и контролите за надеждност. В основния експериментален набор от данни бяха включени само общини с пълни записи. Това гарантира, че едни и същи наблюдения на ниво община могат да се използват последователно при изграждането на индикатори, предварителната обработка, параметризацията и дизайна на сценарии.

Раздел 3.3 трансформира суровите данни на ниво община в производни епидемиологични и здравни показатели за капацитета. Показателите бяха случаи на 100 000 жители, легла на 100 000 жители, индикатор за натиск върху капацитета и темп на растеж януари-февруари. Тези показатели бяха използвани като променливи за непрекъсната емпирична подготовка, а не като произволни категорийни групи.

ГЛАВА 4: Експериментални резултати от стратегии за оптимизация за управление на здравеопазването по време на пандемия: Казусът COVID-19 в Косово

Тази глава представя емпиричната валидация на предложената Интегрирана хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения (IHDSF), използвайки казус в здравеопазването, свързан с COVID-19 в Косово. Експерименталният анализ оценява компонентите за прогнозиране, оптимизация и симулация на предложената рамка чрез имплементация, базирана на MATLAB, и сценариеен анализ.

Главата изследва как прогнозирането на епидемиологичното търсене, разпределението на болничния капацитет и симулационно подпомогнатата оценка могат да подпомогнат вземането на решения в здравеопазването по време на пандемични условия. Представените експерименти оценяват ефективността на прогнозирането, използването на ресурсите, стратегиите за координация на болниците и оперативната устойчивост при алтернативни сценарии в здравеопазването.

4.1 Данни от казуса в Косово и експериментална установка

Експерименталната настройка е умишлено представена в компактен вид, тъй като главата за проектиране на данни вече документира правилото за избор на община, производните индикатори, логиката за предварителна обработка и допусканията за параметризация. Следователно ролята на Раздел 4.1 е да позиционира изчислителните резултати в рамките на една и съща верига от доказателства, без да се повтаря главата за подготовка на данните. Това разделяне осигурява ясно разграничение между експерименталната подготовка и изчислителния анализ. Глава 3 документира как емпиричните входни данни са били конструирани, проверени, трансформирани и параметризирани, докато Глава 4 представя резултатите, генерирани при изпълнението на интегрираната рамка SEIR-kNN-MILP-DES. Ключовата характеристика на казуса на Косово е взаимодействието между регионалния натиск от търсенето и ограничените здравни ресурси. Само суровият брой на инфекциите не е достатъчен за подпомагане на вземането на решения, тъй като болниците с по-нисък

абсолютен брой случаи все още могат да се сблъскат с натиск, ако капацитетът на наличните легла и интензивни отделения е пропорционално по-малък. Поради тази причина по-късните резултати се интерпретират като изходи, съобразени с капацитета, а не като прости епидемиологични описания.

Компютърният анализ използва една и съща емпирична база във всички модули. Това е важно за съгласуваността на докторско ниво: прогнозният слой, разпределителният слой и симулационният слой не трябва да изглеждат като три несвързани експеримента. Вместо това, резултатът от единия модул става структуриран вход на следващия модул. Прогнозирането генерира сигнали за търсене, оптимизацията ги преобразува в решения за разпределение, а симулацията оценява дали тези решения остават оперативно осъществими при стохастичен поток от пациенти.

Тъй като пълните оперативни записи на ниво пациент не са еднакво достъпни за всеки болничен процес, главата разграничава подкрепените числени резултати от експерименталните резултати, базирани на сценарии. Това разграничение засилва научната надеждност на главата, като избягва неподкрепени твърдения, като същевременно позволява на рамката да демонстрира практическа стойност за подпомагане на вземането на решения при условия на ограничени ресурси.

4.2 Резултати от прогнозиране на SEIR-kNN и оценка на търсенето

Резултатите от прогнозирането се интерпретират като принос за подпомагане на вземането на решения, а не като крайна цел на дисертацията. В управлението на здравеопазването по време на пандемия, стойността на прогнозата зависи от това дали тя може да подпомогне планирането на капацитета надолу по веригата, разпределението на леглата, готовността на интензивните отделения и оперативната симулация. Поради тази причина резултатите от SEIR-kNN са последвани незабавно от преобразуване на търсенето в болниците и интензивните отделения.

Моделът SEIR-kNN комбинира механистична епидемична структура с адаптивно актуализиране на параметрите. SEIR структурата позволява интерпретирането на процеса на прогнозиране чрез състояния на чувствителност, експониране, инфекциозност и възстановяване/отстраненост, докато kNN компонентът адаптира параметрите към моделите на сходство на ниво община. Тази хибридна структура е подходяща за малък набор от данни на ниво община, защото избягва третирането на всички общини като идентични, като същевременно запазва епидемиологичното значение.

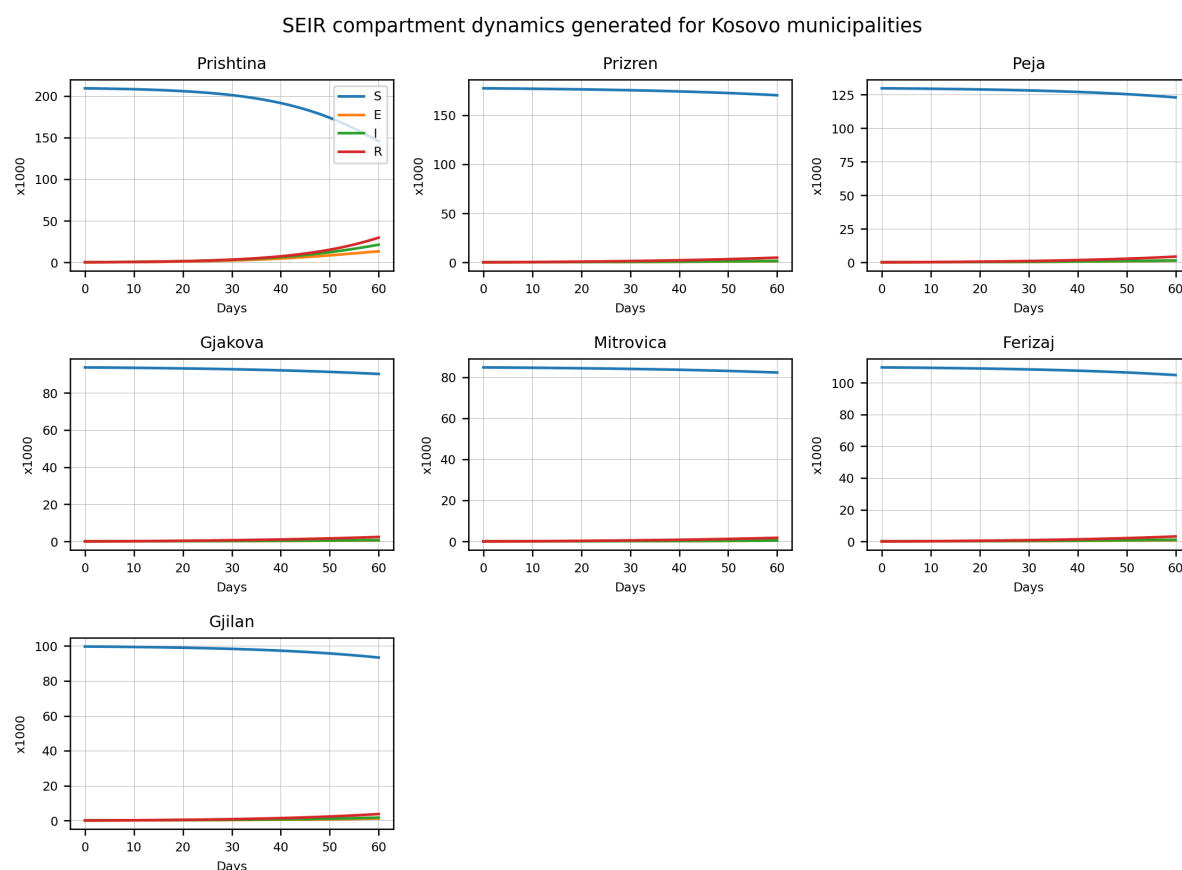
Анализът в този раздел запазва само прогнозните резултати и подкрепените валидационни доказателства, необходими за Глава 4. Повтарящи се SEIR уравнения, подробни обяснения за диапазоните на параметрите и опционални показатели, изискващи допълнителни валидационни вектори на ниво община, не се повтарят в основния текст. Тези елементи са запазени в главата за методологията или в подкрепящите материали за възпроизводимост, докато настоящият раздел се фокусира върху прогнозните резултати, валидационните

доказателства, к-чувствителността и резултатите от преобразуването на търсенето, необходими за последващия анализ на разпределението и симулацията.

4.2.1 Прогнозни траектории на общинско ниво и изходни параметри

Таблица 4.1. Стойности на параметрите SEIR-kNN на ниво община и прогнозиран пикови резултати

Община	Бета	Сигма	Гама	Връх	Пиков ден
Прищина	0.230	0.220	0,090	21 311	Ден 60
Призрен	0.188	0,192	0,125	1461	Ден 60
Пея	0.213	0.188	0.130	1453	Ден 60
Гякова	0.188	0,192	0,125	733	Ден 60
Митровица	0.202	0.180	0,140	455	Ден 60
Феризай	0.180	0.201	0.114	1102	Ден 60
Гнилан	0,184	0.209	0,103	1689	Ден 60



Фигура 4.1. Динамика на SEIR, генерирана за общини в Косово през 60-дневния прогнозен хоризонт.

Траекториите на Фигура 4.2 подкрепят аргумента, че системата на Косово не трябва да се моделира само чрез една национална крива. Разликите на ниво община са от значение, защото търсенето на болнични услуги възниква локално, преди да бъде координирано на национално ниво. Прищина доминира в прогнозния сигнал, но регионалните общини остават важни, защото могат да възникнат местни затруднения, дори когато националният или системният капацитет изглежда достатъчен.

Прищина генерира най-големия пиков сигнал, докато Призрен, Пея и Гилян също генерират съответен прогнозен натиск. Следователно стойностите на параметрите осигуряват връзката между емпиричните профили на общините и резултатите от оценката на търсенето надолу по веригата.

4.2.2 Преобразуване от прогноза към търсене

Преобразуването на търсенето на болници е централен мост в дисертацията, защото трансформира прогнозираните инфекции в количества, които могат да бъдат използвани от модели за оперативни изследвания. Прогнозираният брой случаи не определя директно проблема с разпределението на болниците; той трябва да бъде преобразуван в показатели за очаквано търсене на болнични легла, търсене на стрес, търсене на интензивно отделение и недостиг на капацитет. Това преобразуване прави прогнозния слой оперативно релевантен.

Приоритетните етикети в Таблица 4.3 трябва да се тълкуват като приоритети за планиране, а не като клинични класификации. Тяхната цел е да посочат къде натискът, получен от прогнозите, е по-силен и къде трябва да се обърне внимание при разпределението надолу по веригата или анализа на капацитета за увеличаване на капацитета. Тази интерпретация избягва представянето на таблицата като система за медицински триаж и я оставя в рамките на обхвата на дисертацията за подпомагане на вземането на решения.

Таблица 4. 2. Прогнозен сигнал на SEIR-kNN и предварителна продукция за търсене на пластове по общини

Община	Наблюдавани случаи от януари до февруари	Прогнозирани случаи за март-април	Сигнал за търсене в болницата 15%	Приоритет
Прищина	2700	3 210	481.5	Високо
Призрен	1700	1840	276.0	Умерено
Пея	1100	1230	184.5	Умерено
Гякова	850	920	138.0	Умерено
Митровица	650	710	106,5	Ниско
Феризай	1050	1130	169.5	Умерено
Гнилан	950	1040	156.0	Високо

4.2.3 Точност на прогнозата и k-чувствителност

Таблица 4.3. Обобщение на валидирането на прогнозата и резултат от k-чувствителността

Конфигурация	MAE	RMSE	Тълкуване
Статичен SEIR	Няма данни	Няма данни	Само базов протокол; няма числено твърдение без повторно изпълнение с използване на същия валидационен файл
SEIR-kNN, k = 3	604.20	681.60	Повече локална адаптация, по-висока дисперсия
SEIR-kNN, k = 5	568,75	631.71	Най-добре отчетеният баланс в тази настройка
SEIR-kNN, k = 7	591,40	657,80	По-плавна адаптация, малко по-висока грешка
SEIR-kNN, k = 9	623.10	701.20	Прекомерно изглаждане на специфичните за общината динамики

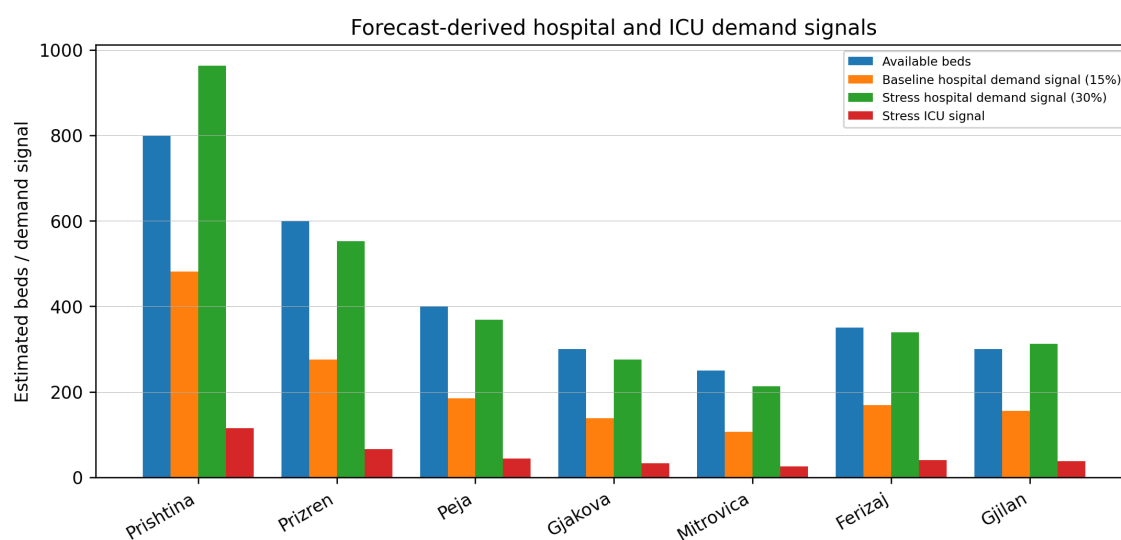
Обобщението на валидирането е умишлено консервативно. Главата представя само MAE и RMSE, тъй като това са поддържаните агрегирани показатели за валидиране. Относителни мерки като MAPE или нормализирана RMSE могат да бъдат полезни, но те трябва да бъдат включени в основната глава само когато е прикачен и проверен пълният наблюдаван вектор за валидиране на ниво община. Това запазва проследимостта и избягва неподкрепени твърдения за валидиране.

Проверката на чувствителността за k е важна, защото адаптацията на параметрите, базирана на kNN , може да бъде или твърде локална, или твърде плавна. Малка стойност на k може да реагира силно на локалните вариации, докато голяма стойност може да осредни специфичните за общината сигнали. Докладваният минимум при $k = 5$ подкрепя избраната конфигурация и показва, че моделът не е параметризиран произволно.

4.2.4 Сигнали за търсене в болниците и интензивните отделения

Таблица 4.4. Сигнали за търсене в болниците и интензивните отделения, получени от прогнози

Община	Прогнозирани случаи	15% болница	30% стрес	Отделение за интензивно лечение на стрес	Разлика в капацитета
Прищина	3 210	481.5	963.0	115.6	163.0
Призрен	1840	276.0	552.0	66.2	0.0
Пея	1230	184.5	369.0	44.3	0.0
Гякова	920	138.0	276.0	33.1	0.0
Митровица	710	106,5	213.0	25.6	0.0
Феризай	1130	169.5	339.0	40.7	0.0
Гнилан	1040	156.0	312.0	37.4	12.0



Фигура 4.2. Сигнали за търсене на болнични и интензивни отделения, получени от прогнози, по общини.

Положителната разлика в капацитета за стрес в Прищина и Гнилан показва, че най-голямото абсолютно търсене и регионален натиск върху капацитета трябва да се интерпретират

заедно. Прищина има най-голям сигнал за търсене, докато Гнилан показва как една по-малка община все още може да стане релевантна при интерпретация на стрес, съобразена с капацитета. Тези констатации оправдават включването на резултатите от търсенето в разпределението на MILP и валидирането на DES, вместо да се третират като крайни резултати.

Крайният резултат от прогнозата е преобразуването на прогнозираните инфекции в показатели за търсене в болници и интензивни отделения. При базовото допускане от 15%, търсенето остава под номиналния капацитет на леглата в пълния набор от данни. При консервативното допускане за стрес от 30%, Прищина става първата община с положителна разлика в капацитета, докато Гилян също показва натиск при конфигурацията на стрес.

4.3 Резултати от разпределението на болниците въз основа на MILP

Резултатите от MILP разглеждат различен въпрос за вземане на решение от резултатите от прогнозирането. Прогнозирането оценява бъдещия натиск, но не решава как пациентите трябва да бъдат разпределени между болниците. Слойът MILP преобразува информацията за търсенето и капацитета в решения за разпределение, модели на трансфер и диагностика на незадоволено търсене. Ето защо главата оценява липсата на координация, алчното разпределение, MILP с локален приоритет и MILP с глобални разходи при един и същ сценарий.

Разделът също така разграничава два вида недостиг. Първият е предотвратимо локално претоварване, при което някои болници са претоварени, докато други имат неизползван капацитет. Вторият е неизбежен системен недостиг, при който общото търсене надвишава общия капацитет. Това разграничение е от съществено значение, защото координацията може да реши първия проблем, но не може да реши втория без увеличаване на капацитета.

Следователно резултатите се интерпретират с повишено внимание. Целта не е да се твърди, че MILP автоматично доминира всяка евристика във всеки малък случай. По-скоро целта е да се покаже кога е необходима координация, кога евристиката може да съответства на оптимизирано с локален приоритет решение и кога оптимизацията трябва честно да докладва за незадоволено търсене, защото системата е глобално дефицитна по капацитет.

4.3.1 Базови и координирани сценарии за разпределение

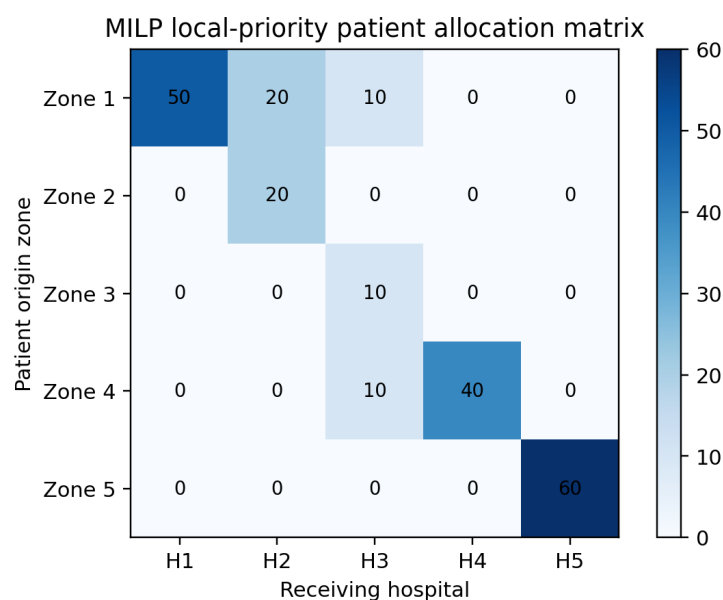
Таблица 4.5. Сравнение на базовата линия и MILP за сценария с достатъчен капацитет

Метод	Неудовлетворени пациенти	Прехвърлени пациенти	Цена на трансфер	Претоварени болници
Няма координация	40	0	0	2
Алчен най-близък наличен	0	40	81	0
MILP с местен приоритет	0	40	81	0
Глобални разходи за MILP	0	50	77	0

Алчният евристичен метод за най-близкия наличен вариант и решението с локален приоритет на MILP водят до едни и същи агрегирани разходи за трансфер в този малък и достатъчен капацитет случай: и двата метода прехвърлят 40 пациенти на цена 81 и елиминират незадоволеното търсене. Това равенство е докладвано изрично, за да се избегне преувеличаване на резултата от MILP с локален приоритет.

MILP с глобални разходи намалява разходите за трансфер от 81 на 77, но изисква повече движение на пациенти. Следователно, оперативната интерпретация не е просто, че вариантът с глобални разходи винаги е за предпочитане. В условия на пандемия, прехвърлянето на допълнителни пациенти от зони без претоварване може да бъде административно разрушително. Следователно MILP с локален приоритет се интерпретира като по-оперативно консервативен вариант, докато вариантът с глобални разходи демонстрира теоретичния потенциал за минимизиране на разходите.

4.3.2 Матрица на разпределение и модел на трансфер



Фигура 4.3. Матрица за разпределение на пациенти с локален приоритет по MILP, генерирана от сценария с пет болници.

Матрицата на разпределение е запазена в основния анализ, защото тя представя числената структура на координираното разпределение по прозрачен и одитиран начин. За да се избегне визуално и аналитично повторение, основният текст запазва матрицата на разпределение, а не едновременно матрицата на разпределение и цифрата за трансферната мрежа. Матрицата е по-подходяща за този раздел, защото предоставя директни числени доказателства, подкрепя Таблица 4.7 и Фигура 4.5 и позволява на читателя да провери как препълнените пациенти се преразпределят в болничната мрежа, като същевременно се спазват ограниченията на капацитета.

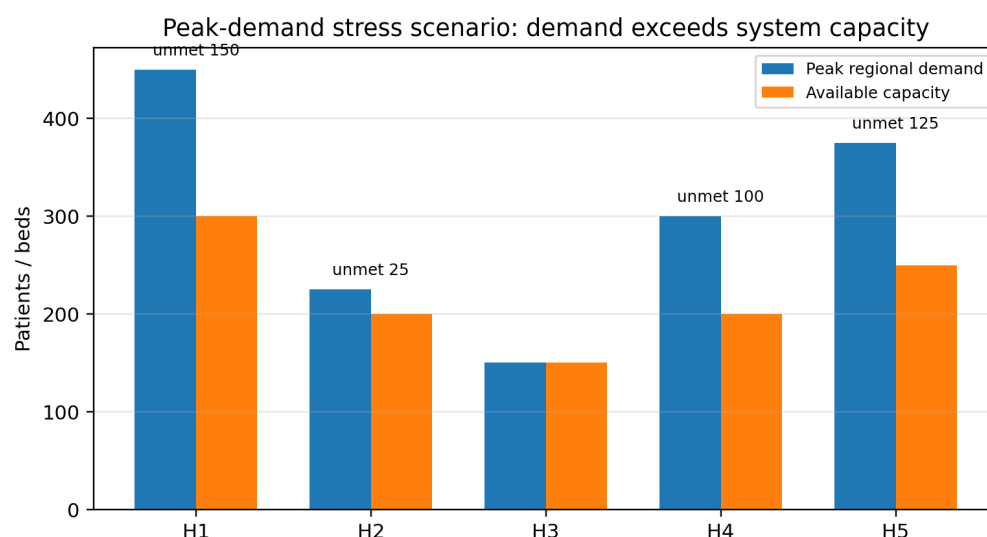
Политиката за местен приоритет е оперативно значима в контекста на пандемия. Тя избягва ненужното преместване на пациенти, които могат да бъдат лекувани локално, като същевременно пренасочва препълнените пациенти от претоварени зони към болници с

останал капацитет. Това намалява предотвратимото локално претоварване, без да създава прекомерни смущения при прехвърлянето.

4.3.3 Сценарий на пиково натоварване

Таблица 4.6. Диагностика на осъществимостта за сценария на пиково натоварване

Болница	Пиково търсене	Капацитет	Незадоволено местно търсене	Използване без пренапрежение
zH1	450	300	150	100%
H2	225	200	25	100%
H3	150	150	0	100%
H4	300	200	100	100%
H5	375	250	125	100%
Общо	1500	1100	400	-



Фигура 4.4. Сценарий на пиково натоварване, показващ търсене над наличния капацитет на системата.

Сценарият с пиково търсене е умишлено запазен като основен резултат, защото той изяснява границата на оптимизация. Когато търсенето е 1500, а капацитетът е 1100, недостигът не е неуспех при разпределението; това е дефицит на системния капацитет. Моделът MILP е ценен, защото прави този дефицит ясен и количествено определя минималното незадоволено търсене или необходимия пиков капацитет.

Този резултат е важен за тълкуването на политиките. Моделът за координация между болниците може да подобри разпределението, но не може да създаде физически капацитет, когато общата система е с недостиг от 400 пациенти. Следователно, правилното заключение за подкрепа на решенията е, че разпределението трябва да се комбинира със спешни легла, временни лечебни отделения, мобилизиране на персонала и външна подкрепа.

4.3.4 Анализ на чувствителността

Резултатите от чувствителността разширяват оценката на MILP отвъд един-единствен сценарий. Пандемичните условия са несигурни и както търсенето, така и ефективният

капацитет могат да се променят бързо. Търсенето може да се увеличи поради вълни на инфекция, докато ефективният капацитет може да намалее поради заболяване на персонала, недостиг на оборудване или ограничения при трансфер. Таблицата за чувствителност обхваща тази съвместна уязвимост.

Сценарият за възстановяване е полезен и защото показва, че допълнителният капацитет може да намали незадоволеното търсене дори при сериозен скок. Оставащото незадоволено търсене обаче показва, че малките добавени капацитети може да не са достатъчни при голяма вълна. Това засилва практическата препоръка, че планирането на скока трябва да бъде пропорционално на тежестта на стреса, а не да се третира като фиксирана административна корекция.

4.4 Резултати от симулация на болнични операции, базирана на DES

DES слойт оценява оперативните последици от натиска в болницата. Това е необходимо, защото осъществимостта на разпределението не е същото като оперативната осъществимост. Една болница може да има номинален капацитет от легла, но все пак могат да се образуват опашки, когато пристиганията са стохастични, времето за обслужване е променливо, престоят в интензивното отделение е дълъг и наличието на персонал ограничава пропускателната способност.

Следователно резултатите от симулацията се интерпретират чрез оперативни ключови показатели за ефективност (KPI): използване на интензивното отделение, средно време на чакане, брой лекувани пациенти на ден и незадоволено търсене на интензивно отделение. Тези показатели са по-значими за болничните операции, отколкото само разходите за разпределение, защото показват как се държи болничната система, когато потокът от пациенти взаимодейства с ограничени ресурси за интензивно лечение.

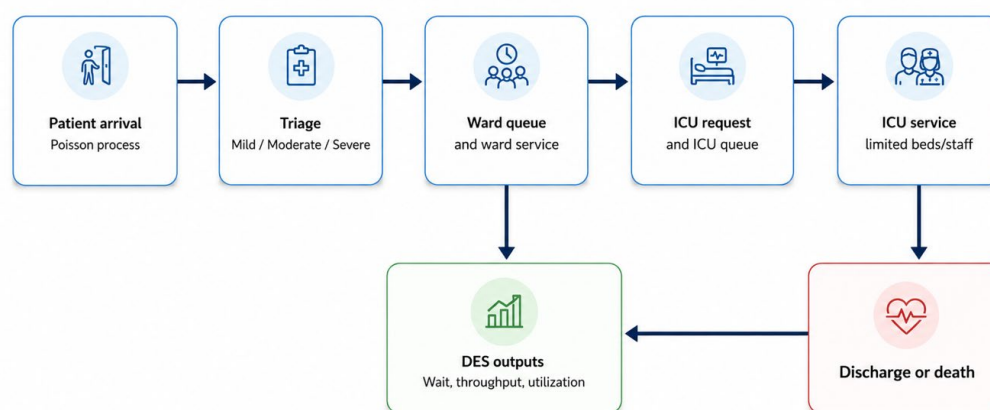
Главата запазва фигурата на архитектурата на DES, таблицата с основните сценарии и таблицата за оперативни подобрения, тъй като това са основните елементи, необходими за оперативна валидация. Базовите параметри на симулация, дневниците на събитията, шаблоните за доверителни интервали и заместителите за р-стойности са изключени от основния текст, освен ако не са подкрепени от окончателни записи за изпълнение.

4.4.1 Сравнение на сценарии

Таблица 4.7. Резултати от сценария DES за болничната дейност в Косово

Сценарий	Използване на интензивното отделение	Средно време на чакане	Пациенти/ден	Незадоволено търсене в интензивното отделение
А - Базова линия	79%	5,2 часа	162	6%
В - Препълване на интензивното отделение	114%	11,6 часа	145	28%
С - Оптимизиран	88%	3,6 часа	176	4%

DES-based MATLAB/SimEvents architecture for hospital operations simulation



Фигура 4.5. Архитектура на модела на болничните операции, базиран на DES.

Сценарият с препълване на интензивното отделение е критичният стрес тест. След като използването на интензивното отделение надвиши 100%, системата вече не работи в рамките на наличния капацитет. Увеличаването на времето за чакане и намаляването на пропускателната способност показват, че претоварването на интензивното отделение влияе върху целия процес на потока от пациенти, а не само върху самия ресурс на интензивното отделение.

Оптимизираният сценарий демонстрира ефекта от целенасочена интервенция. Увеличение на капацитета на интензивните отделения с 10%, комбинирано с преразпределение на персонала, не само намалява използването им; то също така намалява времето за чакане, увеличава пропускателната способност и намалява незадоволеното търсене на персонал в интензивните отделения. Комбинираният ефект подкрепя заключението, че добавянето на капацитет трябва да бъде съпроводено с оперативно планиране на персонала.

4.4.2 Подобрение на работата при оптимизирана конфигурация

Таблица 4.8. Подобрение в работата при оптимизирана DES конфигурация

Индикатор	Референция	Оптимизирана стойност	Подобрение
Средно време на чакане	5,2 часа изходно ниво	3,6 часа	30,77% намаление
Дневен капацитет	145 пациенти/ден препълване	176 пациенти/ден	21,38% увеличение
Незадоволено търсене в интензивното отделение	28% преливане	4%	85,71% намаление
Използване на интензивното отделение	114% препълване	88%	Претоварването е решено

Процентите на подобрение са централни количествени констатации на раздела за DES. Намаляването на времето за чакане се измерва спрямо изходното ниво, тъй като отразява подобрението, насочено към пациента, при оптимизирана операция. Подобрението на пропускателната способност и намаляването на неудовлетворените нужди в интензивното

отделение се измерват спрямо сценария за препълване на интензивното отделение, тъй като отразяват възстановяване от критичното стресово състояние.

Най-силното относително подобрение е намаляването на незадоволеното търсене на интензивни отделения от 28% на 4%. Това не означава, че системата е свободна от напрежение; оптимизираното използване на интензивните отделения остава 88%, което все още изисква мониторинг. Това обаче показва, че целенасочена оперативна намеса може да премести системата от състояние на препълване в много по-управляемо оперативно състояние.

4.5 Интегрирана оценка на рамката SEIR-kNN-MILP-DES

Интегрираната оценка е частта от главата, която свързва отделните резултати с приноса на дисертацията. Приносът не е изолираното използване на SEIR-kNN, MILP или DES. Приносът е структурирана комбинация от прогнозиране, разпределение и оперативно валидиране в единна рамка за подпомагане на вземането на решения за здравна среда с ограничени ресурси.

Тази интеграция също подобрява интерпретируемостта. Политикът може да види как грешката в прогнозата влияе върху интерпретацията на търсенето, как търсенето влияе върху осъществимостта на разпределението, как разпределението взаимодейства с оперативните пречки и как стресът от сценария влияе върху справедливостта и стабилността. Следователно рамката предоставя по-богат поглед върху подкрепата за вземане на решения, отколкото всеки изолиран модел.

В интегрирания раздел се избягва повтарянето на едно и също общо твърдение твърде много пъти. Главата веднъж заявява, че компонентите са допълващи се, и след това подкрепя това твърдение чрез обобщение на KPI, сравнение на аблацията, топлинна карта на чувствителността и таблица за справедливост/баланс на натоварването.

4.5.1 Обобщение на интегрираните ключови показатели за ефективност

Таблица 4.9. Интегрирано числено обобщение на ключовите показатели за ефективност (KPI) от изчислителните експерименти

Ключов показател за ефективност (KPI)	SEIR-kNN	МИЛП	ДЕС	Интегрирана интерпретация
MAE	568,75	-	-	Грешка при прогнозиране, използвана за оценка на надеждността на прогнозите
RMSE	631.71	-	-	По-големи отклонения, наблюдавани при разпределението надолу по веригата
Незадоволено търсене с достатъчен капацитет	-	0	-	Търсенето е покрито, когато общият капацитет е достатъчен
Незадоволено търсене при пиков стрес	-	400	-	Необходимо е планиране на пренапрежението

Базово използване на интензивното отделение	-	-	79%	Умерено задръстване
Използване на препълване на интензивното отделение	-	-	114%	Търсенето на интензивно отделение надвишава капацитета
Оптимизирано използване на интензивното отделение	-	-	88%	Претоварването е намалено след интервенция
Оптимизирано време за чакане	-	-	3,6 часа	Намалено оперативно забавяне

Най-важното интегрирано послание е, че рамката може да прави разлика между различните режими на отказ. Грешката в прогнозирането е проблем с прогнозната несигурност, незадоволеното търсене при пиково натоварване е проблем с недостиг на капацитет, а препълването на интензивните отделения е проблем с оперативно претоварване. Третирането на всички тези проблеми като един общ проблем с „пандемичния натиск“ би скрило необходимата специфична интервенция.

Интегрираното обобщение на ключовите показатели за ефективност (KPI) показва, че всеки модул допринася с отделна функция за подпомагане на вземането на решения. SEIR-kNN предоставя данни за прогнозиране, MILP оценява осъществимостта на разпределението и незадоволеното търсене, а DES оценява оперативната осъществимост при стохастични болнични условия. Следователно комбинираната рамка е по-силна от всеки изолиран компонент.

4.5.2 Сравнение на аблацията

Сравнението в стил аблация не претендира за статистически аблационен експеримент в смисъл на машинно обучение. То се използва като структурно сравнение на възможностите за подпомагане на вземането на решения. То идентифицира какво може и какво не може да прави всяка конфигурация: прогнозиране, разпределяне и валидиране на операции. Това прави интегрирания принос ясен, без да се добавят неподкрепени числени твърдения.

Пълната конфигурация на SEIR-kNN-MILP-DES е единствената конфигурация, която включва и трите функции. Това не означава, че пълната рамка винаги е необходима за всеки оперативен въпрос; по-скоро показва, че пълната рамка е необходима, когато целта е цялостна подкрепа за решения в здравеопазването по време на пандемия.

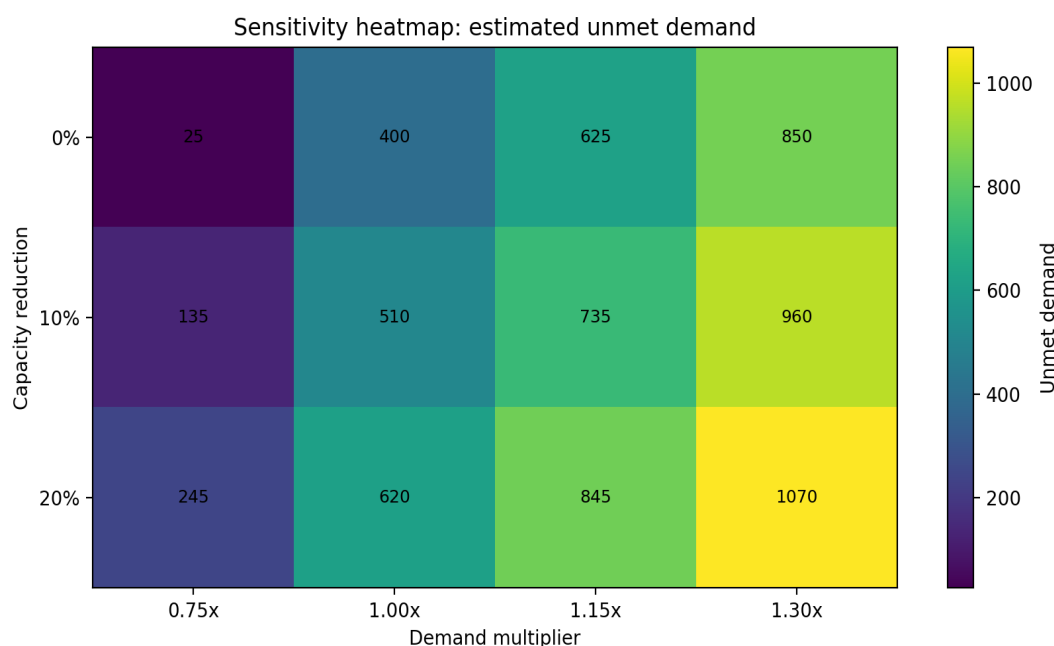
Таблица 4.10. Сравнение на изолирани и интегрирани модели в стил аблация

Конфигурация	Прогнозиране	Разпределение	Оперативно валидиране	Основно ограничение
Само SEIR	Да	Не	Не	Предоставя криви на инфекциите, но не и разпределение на пациентите
Само SEIR-kNN	Да	Частично	Не	Адаптивно прогнозиране, но без оперативна валидация
Само MILP	Не	Да	Не	Изисква външни оценки на търсенето и не моделира опашки

Само DES	Не	Не	Да	Оценява потока, но не предписва оптимално разпределение
SEIR-kNN + MILP	Да	Да	Не	Разпределението не е валидирано при стохастичен поток от пациенти
SEIR-kNN + MILP + DES	Да	Да	Да	Пълна предсказващо-предписващо-оценителна рамка

Сравнението на аблацията потвърждава централния аргумент на главата. Самото прогнозиране не разпределя пациентите, самото оптимизиране не валидира поведението на болничния поток, а самото симулиране не предписва оптимално разпределение. Интегрираната рамка комбинира необходимите функции в една верига от доказателства.

4.5.3 Анализ на сценариите и чувствителността



Фигура 4.6. Топлинна карта на чувствителността на очакваното незадоволено търсене при напрежение в търсенето и капацитета.

Топлинната карта на чувствителността е запазена, защото тя предава устойчивостта по-ефективно от дългата таблица със сценарии в основната глава. Тя показва съвместния ефект на мултипликаторите на търсенето и намаляването на капацитета върху незадоволеното търсене. Този визуален резултат е особено важен за Косово, тъй като ефективният капацитет може да бъде намален поради ограничения в персонала, ограничения в оборудването на интензивните отделения или ограничения за трансфер точно през периодите, когато търсенето се увеличава.

Основното политическо следствие е, че адекватността на изходното ниво не е достатъчна. Една система може да изглежда управляема при референтни условия, но бързо да се претовари, когато търсенето се увеличи или капацитетът намалее. Следователно рамката подкрепя планирането на готовността, като идентифицира къде комбинациите от стрес водят до неприемливо незадоволено търсене.

4.5.4 Равенство и практически последици

Таблицата за справедливост се запазва вместо допълнителна фигура, тъй като числовите стойности са важни. Липсата на координация води до висок индекс на дисбаланс, докато координацията на MILP елиминира дисбаланса в сценария с достатъчен капацитет. Валидирането на DES отново въвежда малък оперативен дисбаланс, тъй като стохастичният поток от пациенти и натискът в интензивното отделение влияят по различен начин върху болниците, дори след подобряване на разпределението.

Адаптивната политика има най-добър профил на балансиране на натоварването, тъй като многократната реоптимизация може да реагира на промените в търсенето и капацитета. Това е практически важно за Косово, тъй като болничното натоварване може да се променя между общините с течение на времето. Решението за статично разпределение може да остане неактуално, ако се променят натискът от инфекции, персоналът или наличността за трансфер.

4.5.5 Ограничения на интегрираната оценка

Резултатите трябва да се интерпретират в рамките на наличните данни. Наборът от данни за Косово се основава на информация на ниво община и болничен капацитет, а не на пълни оперативни записи на ниво пациент. Поради това някои допускания за интензивните отделения, персонала и сценариите се интерпретират като обобщени доказателства, базирани на сценарии. Намалената болнична мрежа по MILP е експериментална тестова среда и трябва да бъде разширена, когато станат налични пълни данни за трансфер на болнично ниво, персонала и интензивните отделения. Стойностите за време на изпълнение, r -стойностите и доверителните интервали трябва да се докладват в основния текст само когато са подкрепени от пълни MATLAB логове за изпълнение и вектори за репликация.

4.6 Заключение на главата

Главата показва, че предложената рамка разглежда три свързани въпроса, свързани с управлението на здравеопазването. Първо, как може да се прогнозира инфекциозният натиск по начин, съобразен с общината? Второ, как трябва да се разпределят пациентите, когато търсенето и капацитетът са неравномерни? Трето, ще останат ли осъществими получените болнични операции, когато пристиганията, заетостта на интензивните отделения и времето за обслужване са динамични? Отговорът изисква пълната верига от прогнозиране-оптимизация-симулация.

Резултатите показват и ограниченията на рамката. Тя е инструмент за подпомагане на вземането на решения, а не гаранция, че всички недостици могат да бъдат елиминирани. Когато общото търсене надвишава общия капацитет, моделът трябва честно да докладва недостига и необходимия резервен капацитет. Когато използването на интензивното отделение надвиши 100%, DES показва, че времето за чакане и пропускателната способност се влошават. Тези открития подсилват дисертацията, защото избягват нереалистични твърдения.

Най-важният практически урок е, че готовността за пандемия трябва да се основава на координирано, основано на доказателства планиране на болничната мрежа. Трябва да се използват регионални показатели, вместо само национални средни стойности; несигурността на прогнозите трябва да се отрази в решенията за разпределение; разширяването на интензивните отделения трябва да се съчетае с преразпределение на персонала; и оперативната симулация трябва да се използва преди прилагането на основни политики за разпределение.

Тази глава представя изчислителната валидация на интегрираната рамка за подкрепа на решенията в здравеопазването при пандемия, базирана на MATLAB, използвайки казуса с COVID-19 в Косово. Експерименталните доказателства следват свързана последователност: подготовка на емпирични данни в Глава 3, прогнозиране на SEIR-kNN, оценка на търсенето в болниците и интензивните отделения, разпределение, базирано на MILP, оперативна валидация, базирана на DES, и интегрирана оценка на устойчивостта и равенството.

Заклучение – обобщение на получените резултати

Заклучения

Тази дисертация разглежда стратегии за оптимизация и алгоритми за решаване на проблеми в здравните системи по време на пандемия и предлага интегрирана рамка за подпомагане на вземането на решения, която свързва епидемиологичното прогнозиране, разпределението на болничните ресурси, оперативната симулация, анализа на устойчивостта и адаптивната обратна връзка. Дисертацията показва, че управлението на здравеопазването по време на пандемия не може да се сведе до един-единствен модел за прогнозиране или един-единствен модел за разпределение. То изисква структурирана последователност, в която се оценява бъдещото търсене, ограниченията на капацитета са представени изрично, политиките за разпределение на кандидатите са оптимизирани и оперативната осъществимост се тества при стохастични условия на потока от пациенти.

Първото основно заключение е, че прогнозирането трябва да бъде оперативно свързано с капацитета на здравеопазването. Прогнозите за инфекциите са полезни за мониторинг на общественото здраве, но управителите на болници се нуждаят от сигнали за търсене, изразени като търсене в отделенията, търсене в интензивните отделения, риск от време на чакане, използване, недостиг и изисквания за капацитет при превишаване на капацитета. Предложеният компонент SEIR-kNN отговаря на това изискване, като комбинира интерпретируема SEIR динамика с адаптация на параметри, базирана на сходство на ниво община. В казуса на Косово този компонент предостави специфични за общината прогнозни траектории и генерира сигнали за търсене, които могат да бъдат прехвърлени към модулите MILP и DES.

Вторият основен извод е, че разпределението на болничните ресурси трябва да се третира като проблем на координираната мрежа. В сценария с достатъчен капацитет,

некоординираното разпределение създава предотвратимо локално претоварване, въпреки че системният капацитет е наличен другаде. Моделът на разпределение, базиран на MILP, елиминира предотвратимото незадоволено търсене чрез преразпределяне на препълнените пациенти според капацитета и осъществимостта на трансфера. Вариантът с глобални разходи намали разходите за трансфер, докато вариантът с локален приоритет запази консервативна оперативна логика, като прехвърля само препълнени пациенти. Това потвърждава значението на координираното управление на болничната мрежа по време на пандемичен натиск.

Третият основен извод е, че оптимизацията сама по себе си не е достатъчна без оперативна валидация, базирана на симулация. Математически осъществимо разпределение може все още да генерира опашки, ескалация на времето за чакане, препълване на интензивните отделения и загуба на пропускателна способност, когато пристиганията са стохастични и продължителността на престоя варира. DES слоят показва, че препълването на интензивните отделения може да повиши използването на капацитета над 100%, да увеличи времето за чакане, да намали дневния пропускателен капацитет и да увеличи незадоволеното търсене на интензивни отделения. При оптимизирана конфигурация с разширяване на интензивните отделения и преразпределение на персонала, времето за чакане е намалено, пропускателната способност е увеличена, а незадоволеното търсене на интензивни отделения е намаляло значително. Следователно, симулацията е необходима за оценка дали оптимизираните политики са оперативно безопасни.

Четвъртият основен извод е, че устойчивостта и справедливостта трябва да се оценяват съвместно. Увеличение на търсенето, загуба на капацитет, забавяне на данни, недостиг на персонал и ограничения на трансфера могат да възникнат едновременно по време на пандемия. Анализът на чувствителността и интегрираните ключови показатели за ефективност (KPI) показват, че дори умерен растеж на търсенето може да създаде незадоволено търсене, когато ефективният капацитет е намален. Резултатите за справедливост и баланс на натоварването показват, че адаптивната реоптимизация подобрява регионалния баланс чрез актуализиране на решенията, когато условията на търсене и капацитет се променят. Това потвърждава, че готовността за пандемия трябва да включва не само цели за ефективност, но и устойчивост, справедливост и контекстуална осъществимост.

Като цяло, дисертацията потвърждава стойността на интегрирания подход за прогнозиране, оптимизация и симулация за здравни системи с ограничени ресурси. Предложената рамка не гарантира, че всички недостиги могат да бъдат елиминирани, особено когато общото търсене надвишава общия капацитет. Вместо това, нейната стойност се състои в идентифицирането на прогнозирания натиск, количественото определяне на предотвратимите и неизбежните недостиги, подкрепата за координирано разпределение, разкриването на оперативни пречки и предоставянето на прозрачни доказателства на лицата, вземащи решения, за планиране на свръхпроизводство и адаптивен отговор.

Приноси

Основните приноси на дисертацията са обобщени, както следва:

1) Интегрирана хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения: Тезата предлага интегрирана хибридна рамка за подпомагане на вземането на решения за управление на здравеопазването по време на пандемия, която свързва епидемиологично прогнозиране, моделиране на здравните ресурси, разпределение, базирано на MILP, оперативно валидиране, базирано на DES, и адаптивна логика за обратна връзка. Този принос е оригинален по начина, по който свързва прогнозирането, предписването, валидирането и адаптацията в един съгласуван работен процес, като директно се справя с фрагментацията на съществуващите модели за реагиране при пандемия.

2) Контекстно-осъзнат подход за оценка на търсенето, базиран на SEIR-kNN: Дисертацията разработва и прилага SEIR-kNN логика за оценка на търсенето при пандемия на ниво община. Приносът комбинира интерпретируемостта на SEIR-базираното епидемиологично моделиране с адаптация на параметрите, базирана на сходство, което позволява сигналите за инфекция да бъдат трансформирани в показатели за търсене в болници и интензивни отделения при ограничени, хетерогенни и регионално неравномерни условия на данни.

3) Модел за разпределение на болниците, базиран на MILP: Тезата формулира разпределението на болниците като задача на смесено-цялочислено линейно програмиране, която отчита търсенето, капацитета, използването, недостига и осъществимостта на трансфера. Моделът демонстрира как координираното разпределение може да намали предотвратимото локално претоварване, как решенията за трансфер могат да бъдат ограничени от оперативната осъществимост и как оптимизацията може да идентифицира неосъществимост, когато общото търсене надвишава общия ефективен капацитет.

4) DES-базиран слой за оперативна валидация: Дисертацията интегрира симулация на дискретни събития като слой за оперативна валидация за тестване на последиците от решенията за разпределение върху потока от пациенти. Този принос позволява да се оцени времето за чакане, използването на интензивното отделение, пропускателната способност, незадоволеното търсене и образуването на тесни места при стохастични условия на болнична работа, преди да се интерпретира оптимизираното разпределение като оперативно безопасно.

5) Принос към емпиричното проучване на COVID-19 в Косово: Тезата конструира и параметризира казус на COVID-19 в Косово, подходящ за компютърни експерименти в контекст на здравеопазване с ограничени ресурси. Тя подготвя епидемиологични, демографски и показатели за здравен капацитет на общинско ниво, прилага логика за включване и надеждност, извършва предварителна обработка и нормализиране и генерира готови за MATLAB входни данни за модулите SEIR-kNN, MILP и DES.

6) Интегрирана методология за оценка, базирана на ключови показатели за ефективност (KPI): Дисертацията предлага интегрирана логика за оценка, използваща показатели за точност на прогнозите, търсене в болниците, търсене в интензивните отделения, използване на капацитета, време на чакане, пропускателна способност, незадоволено търсене, устойчивост и справедливост. Този принос подкрепя прозрачното сравнение на базови, координирани, пикови и оптимизирани сценарии, като същевременно показва как всеки модул допринася за качеството на решенията.

7) Доказателства за координирано управление на здравните мрежи: Изчислителните резултати показват, че здравните системи по време на пандемия трябва да се третират като координирани болнични мрежи, а не като изолирани заведения. Тезата демонстрира, че некоординираното разпределение може да създаде предотвратимо претоварване, докато координираното разпределение, базирано на MILP, и оперативните подобрения, тествани чрез DES, могат значително да подобрят производителността на системата, когато капацитетът е достатъчен или е наличен капацитет за превишаване на капацитета.

8) Принос на устойчивостта, чувствителността и ориентираното към справедливостта подпомагане на решенията: Дисертацията включва съображения за устойчивост, чувствителност и справедливост при оценката на решенията в здравеопазването по време на пандемия. Тя показва, че увеличаването на търсенето, намаляването на капацитета, регионалният дисбаланс и ограниченията на достъпа трябва да се оценяват съвместно и че адаптивната реоптимизация може да подобри балансирането на натоварването при променящи се условия на пандемия.

9) Възпроизводимост и принос за имплементацията: Тезата предоставя структуриран изчислителен път, подкрепен от MATLAB-ориентирани ресурси за предварителна обработка, прогнозиране, оптимизация, симулация и интегрирана оценка. Материалите в приложението запазват формули, входни структури, шаблони за сценарии и логика за имплементация, необходими за проверка, разширяване и бъдещо възпроизвеждане на предложената рамка.

10) Практически принос за здравните системи с ограничени ресурси: Предложената рамка е предназначена за контексти, където капацитетът на здравеопазването, наличието на данни и аналитичната инфраструктура може да са ограничени. Като акцентира върху прозрачността, модулността, интерпретируемостта и изчислителната осъществимост, дисертацията предлага практичен подход за подпомагане на вземането на решения за Косово и сравними здравни системи с ограничени ресурси по време на пандемични извънредни ситуации.

Списък на публикациите, свързани с дисертацията

1. Berisha D. and V. Guliashki, "Optimization and Coordination Strategies for Reducing the Impact of the COVID-19 Pandemic: A Survey," *Problems of Engineering Cybernetics and Robotics*, p-ISSN: 2738-7356, e-ISSN: 2738-7364, vol. 83, pp. 58-72, 2025, doi: 10.7546/PECR.83.25.04. <https://www.iict.bas.bg/pecr/2025/83/4-PECR-Berisha-Guliashki.pdf>
2. Berisha D., Guliashki V., "Optimizing Hospital Capacity: A New Hybrid Model for Predicting the Spread of Infection in a Pandemic", *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2025, Editor: Kohei Arai, ISSN: 2367-3389 (electronic), ISBN: 978-3-032-07108-8, ISBN: 978-3-032-07109-5 (eBook), pp. 377-388, **SJR (0,166), Q4**, <https://doi.org/10.1007/978-3-032-07109-5>
3. Berisha D. and V. Guliashki, "A MILP-Based Decision Support Model for Hospital Capacity Management During Pandemics," 2025, Proceedings of the *ConTEL Symposium within the 33rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM 2025)*, pp. SYM5/III-5, 6 pages, IEEE Catalog Number: CFP2587A-ART, ISSN: 1847-358X, September 18-20, 2025, Split, Croatia. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11197336>
4. Berisha, D., "Applying Discrete Event Simulation to Optimize Hospital Operations During a Pandemic," in Proceedings of IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security (TechDefense 2025), Rome, Italy, 2025. https://www.researchgate.net/publication/399826007_Applying_Discrete_Event_Simulation_to_Optimize_Hospital_Operations_During_a_Pandemic

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] World Health Organization, “Global excess deaths associated with COVID-19, January 2020-December 2021,” WHO, Geneva, Switzerland, 2022. [Online]. Available: <https://www.who.int/data/stories/global-excess-deaths-associated-with-covid-19-january-2020-december-2021>. Accessed: Jun. 21, 2026.
- [2] Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD Economic Outlook, Interim Report March 2021: Strengthening the Recovery: The Need for Speed. Paris, France: OECD Publishing, 2021, doi: 10.1787/34bfd999-en.
- [3] International Labour Organization, ILO Monitor: COVID-19 and the World of Work, 7th ed. Geneva, Switzerland: ILO, 2021.
- [4] UNESCO, “Education: From disruption to recovery,” UNESCO, Paris, France, 2021. [Online]. Available: <https://www.unesco.org/en/covid-19/education-disruption-recovery>. Accessed: Jun. 21, 2026.
- [5] D. Bertsimas, L. Boussioux, R. Cory-Wright, A. Delarue, V. Digalakis, et al., “From predictions to prescriptions: A data-driven response to COVID-19,” Health Care Management Science, vol. 24, no. 2, pp. 253-272, 2021, doi: 10.1007/s10729-020-09542-0.
- [6] M. L. Brandeau, F. Sainfort, and W. P. Pierskalla, Eds., Operations Research and Health Care: A Handbook of Methods and Applications. Boston, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2004, doi: 10.1007/b106574.
- [7] A. Ben-Tal, L. El Ghaoui, and A. Nemirovski, Robust Optimization. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2009, doi: 10.1515/9781400831050.
- [8] M. Ehrgott, Multicriteria Optimization, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2005, doi: 10.1007/3-540-27659-9.
- [9] H. W. Hethcote, “The mathematics of infectious diseases,” SIAM Review, vol. 42, no. 4, pp. 599-653, 2000, doi: 10.1137/S0036144500371907.
- [10] A. M. Law, Simulation Modeling and Analysis, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015, ISBN: 978-0-07-340132-4.