



МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ”, СОФИЯ
ФАКУЛТЕТ: МИННОТЕХНОЛОГИЧЕН
КАТЕДРА: МАРКШАЙДЕРСТВО И ГЕОДЕЗИЯ

инж. Симеон Катилеев Кателиев

**ТЕМА: РАЗРАБОТВАНЕ И АНАЛИЗ НА КАРТОГРАФСКИ ПРОЕКЦИИ С
МИНИМАЛНА ЛИНЕЙНА ДЕФОРМАЦИЯ ЗА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за
присъждане на образователна и
научна степен **"ДОКТОР"**

Научна област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.7 Архитектура, строителство и геодезия

Докторска програма: Обща, висша и приложна геодезия

Научен ръководител
доц. д-р инж. Аспарух Камбуров

СОФИЯ, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на 21.01.2025 г. от Разширен катедрен съвет на катедра „Маркшайдерство и геодезия“ към Миннотехнологичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, съгласно Ректорска заповед № РД-13-1 от 16.01.2025 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № РД-13-2/10.02.2025 г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на дд. мм. гggг г. от часа в зала..... нафакултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. Доц. д-р Валентина Николова, председател;
2. Проф. д-р Теменужка Бандрова, външен;
3. Проф. д-р Петър Пенев, външен;
4. Доц. д-р Пенка Кастрева, външен;
5. Доц. д-р Силвия Маринова, външен.

Резервни членове:

6. Доц. д-р Радка Колева, външен;
7. Доц. д-р Кремена Щерева, вътрешен.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1.....

Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия

2.....

Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия

Дисертантът е докторант на самостоятелна подготовка към катедра „Маркшайдерство и геодезия“ на Миннотехнологичен факултет.

Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: инж. Симеон Кателиев

Заглавие: Разработване и анализ на картографски проекции с минимална линейна деформация за територията на България

Тираж: 20 броя

Отпечатано в Издателска къща „Св. Иван Рилски“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Деформацията в картографските проекции представлява промяната в отношението между точките, разположени на земната повърхност и представянето им в равнина (карта). Методите за създаване на различните видове картографски проекции включват тяхното дефиниране спрямо елипсоида (или сферата) и отчитат само грешката от мащаба в центъра на проекцията и крайните точки на зоната на проектиране, но обикновено не съдържат анализ на разпределението на деформациите за цялата територия на обхват спрямо отдалечеността от проекционната ос и вариациите на релефа.

През последните няколко години Националната геодезическа служба (NGS) на САЩ извършва реформа по модернизирането на референтните геодезически системи, използвани в държавата, с цел въвеждане на времево-зависими географски координати, които отразяват динамичния характер на планетата (тектонски движения), както и изчисление на нова еквипотенциална повърхност (геоид) за цялата страна. Паралелно с това разработва и нова система с набор от държавни конформни картографски проекции (SPCS2022) с минимални деформации (LDP), използвайки иновативна методика за анализ и визуалното им представяне с помощта на Географски информационни системи (ГИС). Именно актуалността и значимостта на този нов подход насочи вниманието за разработването на този дисертационен труд като принос към научната общност и практиката в България.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Основна цел на този дисертационен труд е да се приложи методика за разработване на нови, оптимизирани картографски проекции за територията на България с минимални деформации спрямо физическата земна повърхност, използвайки модернизиран подход за проектиране.

Това включва и следните специфични цели:

- Да се усъвършенстват координатните системи в страната;
- Да се подпомогнат професионалните приложения за геодезия, инфраструктурно проектиране, кадастър и редица други.

Формулирани са следните **задачи**:

- I. Да се изяснят дефинициите при картографските проекции и деформациите, свързани с тях.
- II. Да се обоснове същността и значимостта на предмета на изследване.

III. Да се направи обзор на модернизираниите референтни системи и картографски проекции, разработвани в САЩ.

IV. Да се изучат съществуващите картографски проекции в България и да се анализира реалното състояние на техните деформации спрямо земната повърхност за цялата територия на страната, включително оценка за необходимост от тяхното оптимизиране.

V. Да се представи методика за създаване на нови картографски проекции с минимални линейни деформации, отчетени на земната повърхност. Да се опишат пътя и средствата за проектиране и изследвания.

VI. Да се разработи идеен проект за нова система от картографски проекции за България с по-ниски линейни деформации спрямо съществуващите системи, с подробно описание на методиката на работа и пълен анализ на разпределението на деформациите в зоните на проектиране и в населените райони.

Основен обект на научната разработка са картографските проекции, използвани в ежедневианата практика по геодезия, инфраструктурно проектиране, кадастър и редица други области в България и заложенн в нормативната уредба на страната. Тези картографски проекции са в основата на всяка една инженерна дейност и с тяхна помощ се определят площите и местоположението на недвижимата собственост.

Предмет на изследването са характеристиките и особеностите на картографските проекции, които влияят на техните деформации спрямо физическата земна повърхност.

Поставени са следните **изследователски въпроси**:

I. Какви са деформациите на картографските проекции, използвани официално на територията на България, отчетени спрямо земната повърхност?

II. Могат ли да се разработят нови картографски проекции с оптимизирана надеждност и точност, които да подпомогнат геодезическите измервания, инженерното проектиране и кадастърта в страната?

В дисертационния труд са включени следните теоретични и емпирични **методи и средства за изследване**:

- **Теоретичен анализ** - включва оценка на деформациите при различните проекции към система БГС2005 за цялата територия на страната, както и за всички населени места, посредством уравнения за изчисление на комбиниран мащабен фактор. Представени са в графичен и табличен вид разпределенията на деформациите при всяка една от изследваните картографски проекции и статистически анализ на получените резултати;

- **Експеримент** – разработен е идеен проект за оптимизирана конформна конична проекция за цялата страна, както и серия от по-малки картографски зони, които обхващат територията ѝ, условно именувани „Българска геодезическа система 2025“ (БГС2025). Експериментът включва анализ на зони с различен размер на покритие и широк обхват от параметри за различни видове конформни проекции за конкретните зони.

Експерименталната работа е извършена със следните средства:

- ГИС софтуер за визуализиране и анализ на резултатите: ESRI ArcGIS Pro v3.3.1, Global Mapper v25.0.1;
 - Геодезически софтуер за обработка на данни: Trimble Business Center v5.81, BGSTans v4.6.2;
 - Софтуер за изчисления на линейните деформации, картографски параметри, статистически анализ и графично представяне: Microsoft Excel, Notepad++ v8.6.9.
- **Сравнение** – извършено е сравнение на получените статистически резултати за деформациите при новопроектираните картографски проекции (към система БГС2025) и тези към текущата система БГС2005. Направена е оценка на разпределението на деформациите, както за цялата зона на интерес, така и за населените места, попадащи в нея.

В дисертационния труд са направени и обследвани следните основни **хипотези**:

- Коничната проекция към система БГС2005 (Кадастрална система) би трябвало да има по-ниски нива на деформация спрямо УТМ проекциите към БГС2005, предвид формата на държавата и географското ѝ разположение;
- Може да се създаде нова, оптимизирана Ламбертова конформна конична проекция за България, която да обхваща територията на страната и населените места с по-ниски нива на деформации спрямо съществуващата такава проекция към БГС2005;
- Ако се въведе допълнителен слой с набор от конформни картографски проекции с по-малки зони на покритие, ще се постигне намаляване на деформациите в страната, спрямо използване на една зона за цялата ѝ територия;
- В експерименталната част са направени допълнителни хипотези дали определени типове картографски проекции биха били по-подходящи за използване при конкретни зони на проектиране.

1. Научна новост

Дисертационният труд представлява научна новост в следните аспекти:

I. Описана е **методология за оценка и анализ на деформации на картографски проекции спрямо физическата земна повърхност**. Методологията включва използването на съвременни софтуерни приложения за изчисления, ГИС и иновативен подход за представяне на резултатите. Подходът съдържа съставяне на карта на деформациите с цетова скала на покритие спрямо различните нива на линейно изкривяване в части на милион, както и подробен статистически анализ на деформациите спрямо изследваната територия, населените места и населението, попадащи в нея.

II. Демонстрирана е **методика за създаване на нови картографски проекции с минимални нива на деформации**. Методиката включва шест основни стъпки за създаване и въвеждане на нови картографски проекции, като са описани всички необходими изходни данни и прийоми за работа. Предоставени са уравнения за изчисление на деформациите при четирите основни вида конформни картографски проекции, приложими за инженерни дейности. Посочени са подходите за избор на тип проекция, избор и прецизиране на параметрите ѝ. Дадени са конкретни примери за пълно въвеждане и окончателен анализ на новопроектирана координатна система. Включени са подробни примери за работа и представяне на резултатите.

2. Практическа приложимост

Приложена е методика за създаване на картографски проекции и методология изследване на деформациите им, която използва иновативен подход и съвременен софтуер. Тази методология има реално приложение в практиката и може да се използва от професионалистите по геодезия при избор на подходяща проекция за работа или при проектиране на нова система, отговаряща на специфични нужди и изисквания.

Направен е цялостен анализ за деформациите при Българска геодезическа система 2005 (БГС2005), включително UTM проекциите към нея, както и Ламбертовата конична проекция, обхващаща цялата страна (Кадастрална система). Анализът включва визуално представяне на резултатите с карти на деформациите за всяка проекция, както и пълен статистически анализ за диапазоните на покритие с различни нива на деформации спрямо територията на страната, населението и населените места.

Разработен е идеен проект за създаване за нова геодезическа координатна система за територията на България под името „БГС2025“, включваща единна проекция, обхващаща цялата страна, както и три варианта за допълнителен слой с набор от картографски проекции (три, четири и шест зони) с по-малка територия на покритие, които предоставят по-ниски нива на деформации за населените места и са по-подходящи за използване за инженерна дейност.

3. Аprobация

Направено е практическо изследване с помощта на реални измервания с геодезическа апаратура. Измерванията са направени на 4-ти февруари 2025 г. на територията на гр. Пазарджик. Измерени са две точки от работната геодезическа основа (РГО) на града, като е съпоставено хоризонталното разстояние, измерено между двете точки, с разстоянията между тях, отчетени в различните видове картографски проекции. Направена е оценка на получените резултати.

Методиката за създаване на картографски проекции с ниски линейни деформации спрямо физическата земна повърхност е реално приложена в САЩ за създаване на новите държавни проекции за страната в системата SPCS2022.

4. Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в три на брой самостоятелни научни статии (вж. раздел V).

5. Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 222 страници, като включва челна страница, въведение, пет части за решаване на формулираните основни задачи, заключение с изводи и препоръки, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията, използвана литература и 11 приложения.

Цитирани са общо 55 литературни източника, като 28 са на латиница и 15 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 133 фигури, 35 таблици и 77 уравнения.

Номерата на фигурите, таблиците и уравненията в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

II. 1. НАУЧЕН ОБЗОР

Всички картографски проекции съдържат т. нар. деформации или линейни изкривявания, които представляват разликите между истинското физическо разстояние, измерено на земната повърхност и неговото проектиране върху картната равнина. Освен към разстояния, деформациите могат да бъдат отнесени и към ъгли, форми и площи (Бандрова, 2022).

II. 1.1. Изложение на проблема

Същината на проблема е, че когато географски координати, които се отнасят до триизмерна повърхнина (елипсоид или сфера), се изобразят върху равнина (карта), това води до деформиране на дължините, ъглите, формите и площите. Несъответствието между хоризонталното разстояние, измерено върху физическата земна повърхност и неговото проектирано представяне, могат да бъдат изчислени като части на милион (ppm). Деформация от порядъка на ± 400 ppm често може да се наблюдава, например при Универсалната трансверзална Меркаторова система от проекции (UTM), което отговаря на ± 40 cm/km разлика при разстоянията. Такова несъответствие може да бъде недопустимо за някои приложения в практиката, които изискват висока точност на измервания.

Изборът на подходяща координатна система е от изключително значение и трябва да бъде съобразен с изискванията за точност на конкретната работа, задача или проект. Проблемът е, че това често бива пренебрегвано поради две основни причини. Първо, наборът от картографски проекции в България е много ограничен; второ, липсва информация за деформациите на тези проекции за териториите на страната.

II. 1.2. Геодезически референтни системи

Формата на Земята е най-близка до „ротационен“ елипсоид, получен чрез въртене на елипса около една от осите му (Милев & Милев, 2017). След дефинирането на координатните системи, те трябва да бъдат „реализирани“ или отнесени към конкретен „датум“¹ за практическа употреба. Геодезическите датуми са референтни системи, към които се отнасят координатите и височините в геодезическите измервания. Съществуват т. нар. „Хоризонтални датуми“, към които се отнасят елементите от математическата геодезия и „Вертикални датуми“, към които се отнасят височинните измервания (физическа геодезия).

II. 1.2.1. Хоризонтални датуми

Хоризонталният датум предоставя основа за определяне на геодезическите географски координати (ширина и дължина) на точките и техните елипсоидни височини. Съвременните GNSS системи са привързани към определен хоризонтален датум, който по-често бива наричан „референтна система“ (или „референтна рамка“, когато е отнесен към конкретна реализация).

II. 1.2.2. Вертикални датуми

Вертикалният датум предоставя основа за височинни измервания. Ортометричните височини са отнесени към геопотенциалната повърхнина – **геоид**.

¹ „Датум“ в геодезията е пространствена референтна система (например елипсоид) или абстрактна координатна система с референтна повърхност (например морското ниво), която служи за предоставяне на изходни пространствени данни (координати и височини) за геодезически измервания и картографиране. (Кателиев, 2023)

II. 1.2.3. Картографски проекции

Картографската проекция е математическо изобразяване на местоположението на дадена точка от Земята в съответна точка от картата (Бандрова, 2022).

Таблица 2. Конформни проекции използвани за геодезически и инженерни цели

Проекция	Тип	Коментар
Трансверзална (напречна) Меркаторова (ТМ)	Цилиндрична	Използва се за райони, които са издължени в посока север-юг. Може би най-широко използваната проекция за едромасщабно картографиране. Нарича се още „Проекция на Гаус-Крюгер“.
Ламбертова конформна конична (LCC)	Конична	Използва се за райони, които са издължени в посока запад-изток. Също широко използвана както за едромасщабно, така и за дребномасщабно картографиране. Включва версия с един и с два стандартни паралела (версиите са математически идентични).
Наклонена Меркаторова (ОМ)	Цилиндрична	Известна още като „Проекция на Хотин“. Използва се за наклонени райони (северозапад-югоизток или североизток-югозапад). Не е толкова широко разпространена както ТМ и LCC проекциите, но е налична за дефиниране в съвременните софтуерни приложения.
Стереографска (полярна, екваториална или наклонена)	Равнинна	Подходяща за малки площи. При големи площи грешката на мащаба е по-голяма от ТМ, LCC или ОМ проекциите, тъй като проекционната повърхност не се извива спрямо Земята в нито една посока. Може да се реализира като „обикновена“ или „двойна“, но получените координати се различават. Азимуталната (полярна) стереографска проекция (тангираща в полюсите на Земята) се използва за полярните региони. Екваториалната стереографска проекция се използва за екваториалните райони, а наклонената - за всички други географски ширини.

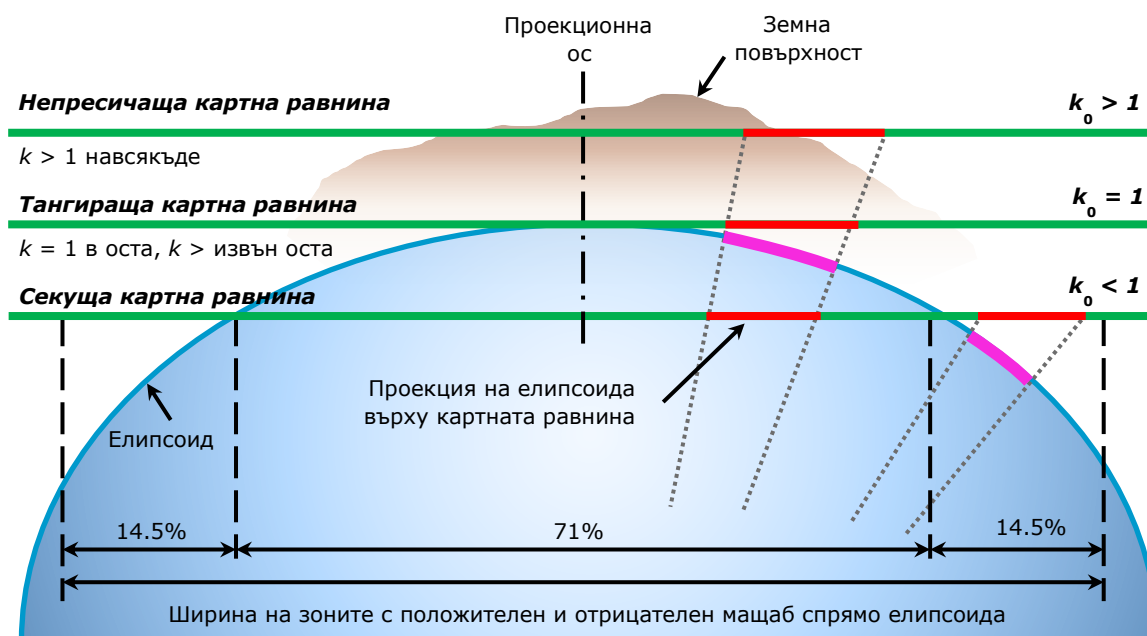
Въпреки че съществуват стотици видове проекции, тези, които се използват в съвременната практика в България, САЩ и в Европейската общност за геодезия и инженерно проектиране, са само няколко основни вида. Те обикновено трябва да отговарят на следните три критерия:

- 1) Трябва да са подходящи за картографиране на сравнително голяма територия на интерес на покритие;
- 2) Трябва да бъдат лесно дефинируеми в софтуерните приложения, които ги използват, в това число CAD, ГИС, BIM и други специализирани приложения;
- 3) Трябва да бъдат конформни, тоест да запазват формата на обектите, които се отразяват върху картата.

На базата на тези три критерия, наборът от конформни картографски проекции подходящи за инженерни приложения, геодезия и кадастър се свежда до четири основни типа (Таблица 2) (Dennis M. L., 2019-b).

II. 1.2.4. Параметри на картографските проекции

Всеки вид проекция, посочен в Таблица 2, обикновено се дефинира с шест параметъра (понякога LCC и OM проекциите изискват седем или осем параметъра). Един от тези параметри е k_0 – мащабно число по проекционната ос. Проекционната ос е линията, по която мащабното число е минимална и постоянна величина спрямо референтния елипсоид. При ТМ проекциите това е централният меридиан (λ_c), при LCC проекциите е централният паралел (φ_c), а при OM проекциите е централната наклонена ос.



Фигура 12. Повърхнини на проекция (секуща, тангираща и непресичаща) (<https://geodesy.noaa.gov/>)

Стойността на k_0 дефинира мащабната зависимост между елипсоида и проекционната конформна повърхнина при следните условия (Фигура 12):

- **$k_0 < 1$.** Картната равнина пресича елипсоида, като част от нея е вътрешна (съдържа се в елипсоида), а извън точките на пресичане тя е външна (над елипсоида). В този случай проекцията се води „секуща“ и често се използва в практиката, тъй като обхваща максимално голяма територия с минимални мащабни грешки (отчетени спрямо елипсоида).
- **$k_0 = 1$.** Картната равнина е тангираща на елипсоида. Тя се допира до елипсоида в проекционната ос (или в точка при стереографската проекция).
- **$k_0 > 1$.** Картната равнина е над елипсоида и не го пресича никъде. Този подход се използва често за да се доближи равнината на проекцията до земната повърхност, когато тя е над елипсоида. Цели се да се намали деформацията на проекцията спрямо теренната повърхност вместо спрямо елипсоидната повърхнина.

II. 1.2.5. Деформации при картографските проекции

Съществуват два основни типа деформации при картографските проекции:

1) **Линейна деформация (δ)**. Може да се обоснове като крайната разлика в разстоянието между двойка координати върху картата в сравнение с истинското им разстояние, измерено на земната повърхност. Линейната деформация може да бъде положителна или отрицателна. Положителна деформация означава, че разстоянието в проекция е по-дълго от истинското разстояние, измерено на земната повърхност, съответно отрицателна деформация означава, че разстоянието в проекцията е по-късо.

2) **Ъглова деформация**. При конформните проекции ъгловата деформация е равна на ъгъла на конвергенция (γ), който представлява разликата между посоката „север“ на картата и геодезическия север. Ъгълът на конвергенция γ е нула в централния меридиан на проекцията λ_c , положителен на изток от централния меридиан ($\gamma > 0$) и отрицателен на запад от него ($\gamma < 0$).

Обикновено ъгловата деформация не е толкова проблемна, колкото линейната деформация, и може да бъде сведена до минимум с ограничаване на разстоянието до централната ос на проектиране.

II. 1.2.6. Изчисление на линейните деформации

Линейната деформация може да бъде разгледана като феномен, който се получава при отделяне на проекционната повърхност (равнина, конус или цилиндър) от референтния елипсоид. Тя може да се раздели на два основни компонента: първият е деформация вследствие на кривината на Земята, а вторият вследствие на отдалечеността над или под елипсоидната повърхност. Умножението на тези два компонента отразява т.нар. **комбиниран мащабен фактор**, чиято относителната величина във всяка точка на интерес зависи от: 1) Хоризонталното ѝ разстояние ортогонално на основната ос на проекцията; и 2) Височината ѝ спрямо елипсоида.

Линейната деформация може да се дефинира формално в дадена точка с помощта на безкрайно малки (диференциални) разстояния, като:

$$\delta = k \left(\frac{R_G}{R_G + h} \right) - 1 \quad (17)$$

където k е **мащабният фактор** вследствие кривината на Земята (пример за различни ширини на проекционната зона е показан на Таблица 5), а уравнението в скобите е **височинният фактор**, получен вследствие на отдалечеността от елипсоида (промяната в диапазона на линейно изкривяване, дължащо се на промяна в елипсоидната височина е показана на Таблица 6), и R_G е средногеометричен радиус на кривина (по Гаус). Стойността на k се получава от уравнения за мащабния фактор спрямо вида на използваната проекция за всяка избрана точка. (Dennis M. L., 2016)

Комбинираният мащабен фактор, получен при умножението на двата фактора, е относителната величина на общата линейна деформация. Тази стойност е обикновено много близка до единица. За да се направи оценка на изкривяване, от комбинирания фактор се изважда единица за да се получи стойност, която може да бъде представена в части на милион (напр. комбиниран фактор от 0.99998 отговаря на -20 ppm линейна деформация). Пълната стойност на линейна деформация винаги е комбинация от двете изкривявания - първото вследствие на кривината на Земята (Таблица 5) и второто - вследствие на височината от елипсоида (Таблица 6).

Таблица 5. Максимален диапазон на линейни деформации вследствие кривината на Земята (изчислено за ТМ проекции при $42^{\circ}40'$ географска ширина) (Dennis M. L., 2016)

Максимална ширина на зоната	Максимален диапазон на линейно изкривяване $\Delta(\delta + 1) = \Delta k$		
	Части на милион (mm/km)	Разлика в дължината	Съотношение (абсолютна стойност)
25 km	± 1 ppm	± 0.001 m/km	1 : 1 000 000
57 km	± 5 ppm	± 0.005 m/km	1 : 200 000
81 km	± 10 ppm	± 0.01 m/km	1 : 100 000
114 km	± 20 ppm	± 0.02 m/km	1 : 50 000
180 km	± 50 ppm	± 0.05 m/km	1 : 20 000
255 km	± 100 ppm	± 0.1 m/km	1 : 10 000
510 km	± 400 ppm	± 0.4 m/km	1 : 2 500

Таблица 6. Промяна в линейната деформация на проекцията спрямо изменението на елипсоидната височина (изчислено при $42^{\circ}40'$ географска ширина)

Разлика в елипсоидната височина Δh	Максимален диапазон на линейно изкривяване, $\Delta(\delta + 1) = R_G / (R_G + \Delta h)$		
	Части на милион (mm/km)	Разлика в дължината	Съотношение (абсолютна стойност)
± 6.5 m	± 1 ppm	± 0.001 m/km	1 : 1 000 000
± 30 m	± 5 ppm	± 0.005 m/km	1 : 220 000
± 50 m	± 8 ppm	± 0.008 m/km	1 : 130 000
± 100 m	± 16 ppm	± 0.016 m/km	1 : 64 000
± 250 m	± 39 ppm	± 0.039 m/km	1 : 26 000
± 500 m	± 78 ppm	± 0.078 m/km	1 : 13 000
± 1000 m	± 157 ppm	± 0.157 m/km	1 : 6 400
± 1500 m	± 235 ppm	± 0.235 m/km	1 : 4 300
± 2000 m	± 314 ppm	± 0.314 m/km	1 : 3 200
± 3000 m	± 470 ppm	± 0.314 m/km	1 : 2 200

II. 2. МОДЕРНИЗИРАНИ РЕФЕРЕНТНИ СИСТЕМИ И КАРТОГРАФСКИ ПРОЕКЦИИ В САЩ

Съществуващите пространствени референтни системи в САЩ са въведени през 80-те години на XIX век. С течение на времето е открито, че тези системи имат много отклонения и неточности поради начина, по който са дефинирани и поради измененията на земната кора, които са настъпили във времето. Националната геодезическа служба на САЩ (NGS) разработва нови референтни системи с подобрена точност и надеждност, подхождайки с фундаментална промяна в тяхната концепция и дизайн.

II. 2.1. Текущи хоризонтални и вертикални датуми в САЩ

Референтните системи в САЩ често се използват неправилно, което е един от основните проблеми на всички специалисти, занимаващи се с геопространствени данни. GNSS спътниците се отнасят към „глобални“ референтни системи, които са различни от използваните в момента „локални“ (континентални) референтни системи в САЩ. Текущите датуми за равнинни и височинни данни (NAD83 и NAVD88), въпреки че все още се използват официално в страната, е доказано, че имат сериозни недостатъци (NGS, NSRS Modernization, 2024).

II. 2.1.1. North American Datum 1983 (NAD 83)

NAD83 е текущият хоризонтален датум в САЩ. Използва се навсякъде в Северна Америка, с изключение на Мексико. Реализира се в континенталната част на САЩ и в Аляска (Северноамериканска тектонска плоча) чрез Националната мрежа от Перманентни референтни GNSS Станции (CORS).

Най-новата реализация на NAD83 е именувана NAD83 (2011, PA11 или MA11 според различните тектонски плочи) в епоха 2010.0. Съпоставена с глобалната WGS84(G1762), тя се различава около 1-2 m в рамките на CONUS. Въпреки че NAD83 е проектирана като геоцентрична референтна система, тя е изместена от масовия център на Земята с около 2.2 m, което на практика я прави негеоцентрична (Smith, Improving the National Spatial Reference System, 2010). За много съвременни приложения такава голяма неточност е неприемлива.

II. 2.1.2. North American Vertical Datum of 1988 (NAVD88)

NAVD88 е височинна референтна система, установена през 1991 г. с изравнение на нивелачни ходове от Канада до Мексико през целите Съединени щати. Създаването на тази нивелачна мрежа е бил много мащабен проект отнел близо 90 години и включващ над два милиона километра геометрична нивелация (първи, втори и трети клас) и гравиметрични измервания на над 800 000 репера.

Чрез спътниковата гравитационна мисия GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) (GRACE) на НАСА е създаден геоиден модел в континентален мащаб, който показва, че височините на NAVD88 са били със

средно отклонение от 50 cm в континенталната част на САЩ и наклонени на около 1 m от Тихоокеанския северозапад до Атлантическия югоизток (Smith, 2010).

II. 2.1.3. Държавна равнинна координатна система (SPCS 1983)

Държавната равнинна координатна система (SPCS) е съвкупност от конформни картографски проекции, създадени от NGS. Тези проекции се използват за подпомагане на дейности по геодезия, инженерство и картографиране в Съединените щати и техните територии. Текущият набор от 107 щатски проекции SPCS83 е разработен върху референтната система NAD83.

II. 2.2. Нови референтни и координатни системи в САЩ

За да подобри Националната пространствена референтна система (NSRS) на САЩ, NGS заменя текущите северноамерикански датуми, отнесени към системата „North American Datum of 1983“ (NAD83) с четири нови наземни пространствени референтни рамки, реализирани предимно чрез GNSS, вместо чрез съществуваща геодезическа основа. Агенцията преминава към тези нови системи за да отрази динамичния характер на планетата (Smith, et al., 2021).

II. 2.2.1. Нова национална референтна система (NSRS2022)

Основното и „най-осезаемо“ движение, което всяка една тектонска плоча извършва, е ротацията, което допринася за времева зависимост на измерванията на Земята. Точката на тази ротация се нарича точка на Ойлер (Фигура 26).

Тъй като териториите на САЩ се намират в четири тектонски плочи е необходимо да се въведат четири наземни референтни рамки (TRF2022):

- Северноамериканска наземна референтна рамка (NATRF2022)
- Тихоокеанска наземна референтна рамка (PATRF2022)
- Карибска наземна референтна рамка (CATRF2022)
- Марианска наземна референтна рамка (MATRF2022)

За да се намери съотношението на една референтна система, която е фиксирана към плочата (върти се заедно с нея) спрямо идеална референтна система (независима от ротациите на тектонските плочи), е необходима трансформация с три параметъра: географската ширина и дължина на тази точка, както и скоростта на въртене около нея. Координатите на новите наземни референтни системи ще бъдат определени от IGS глобалните им координати и ротационна матрица с три параметъра, която определя времевото отношение:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_t = M^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_t \quad (71)$$

II. 2.2.2. Нов, изцяло геопотенциален датум (NAPGD2022)

Преразпределения на масите в планетата се случват постоянно, заради които се изменя формата на геопотенциалното поле, което съответно променя формата на геоида. За да проследят тези промени, NGS създава система за наблюдение на геоида (GeMS), която има за задача да изгради модел от времево-зависими величини, свързани с ондулации на геоида, промени в гравитацията на повърхността, отклоненията на отвеса, геопотенциални величини и числен модел на релефа.

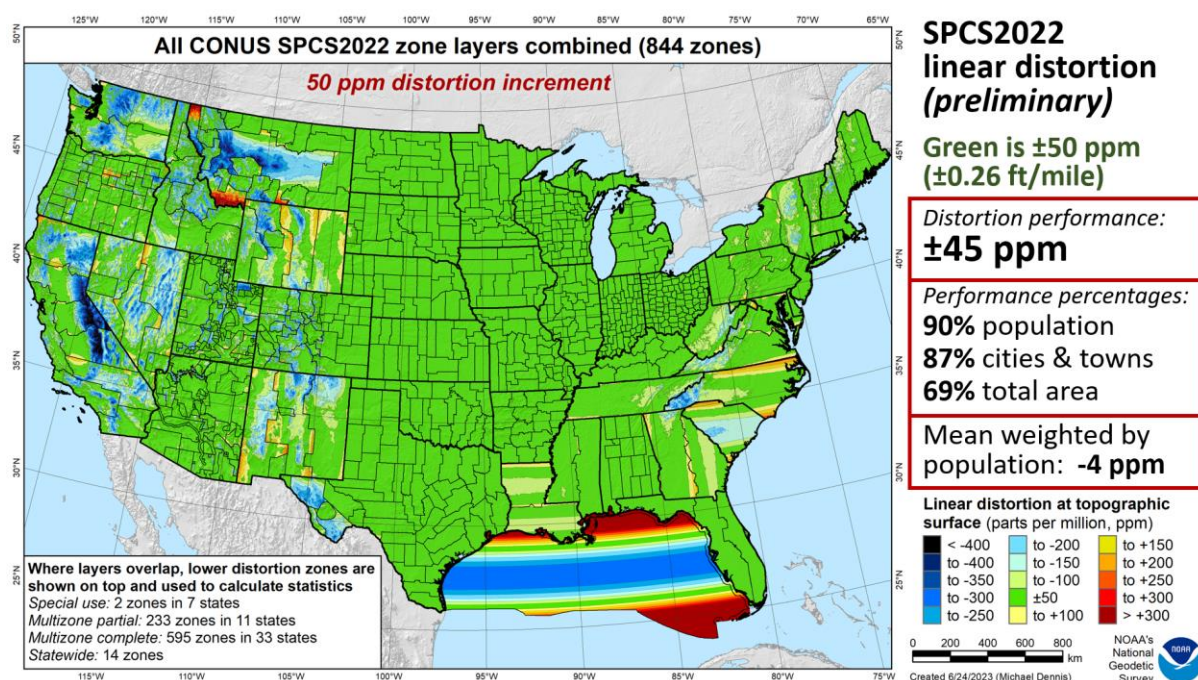
През последните няколко години Агенцията работи по проекта GRAV-D за измерване на гравитационното поле на САЩ посредством въздушно заснемане с гравиметри за изработване на нова височинна система в страната с точност от 2 cm, която е изцяло базирана на гравитационно поле (а не на геометрична нивелация) (Smith, et al., 2021). Името на тази система ще бъде Северноамериканско-Тихоокеански геопотенциален датум 2022 г. (NAPGD2022).

II. 2.2.3. Нови държавни координатни системи (SPCS2022)

В САЩ се работи с две различни мерни единици: „Американски геодезически фут“ и „Международен фут“, дефинициите на които се различават. Смесването им е проблем от десетилетия, поради което NGS възприема единствено Международния фут като стандартна мерна единица за дължина в новата координатна система SPCS2022, наричайки го „The Foot“ или „Футът“ (US Federal Register, 2020).

Щатската координатна система SPCS2022 се разработва като част от прехода от референтната система NAD83 към новата референтна система NSRS2022 (NGS, State Plane Coordinate System of 2022 Policy, 2023). При създаване на всяка проекция (зона) от новата координатна система, критерият за максимално допустима линейна деформация се отнася до измервания на физическата земна повърхност, а не на повърхността на референтния елипсоид, както е било досега. (NGS, Procedures for Design and Modification of the State Plane Coordinate System of 2022, 2023).

NGS ще проектира една нова зона (слой), която обхваща цялата територия на всеки щат. В допълнение на това, всеки щат може по желание да избере да има нула, един или два допълнителни слоя. Такива допълнителни слоеве са основно проектирани и заявени от други заинтересовани страни и включват проекции с минимални деформации (LDP), които ще служат за геодезически и инженерни цели, изискващи по-висока точност. Новата система SPCS2022 все още е в разработка и към момента тя съдържа 844 картографски зони (проекции) в CONUS (Фигура 38) (Dennis M. , 2023).



Фигура 38. Оценка на новопроектираната система от държавни картографски проекции в САЩ – SPCS2022 (<https://geodesy.noaa.gov/>)

II. 3. КАРТОГРАФСКИ ПРОЕКЦИИ В БЪЛГАРИЯ

II. 3.1. Развитие на картографските проекции в България

II. 3.1.1. Кратка история

Геодезията в България започва да се развива в края на XIX век. По-късно, през 1920 г. се учредява Държавен географски институт към министерството на войната, който въвежда Координатна система „1930 г.“ чрез триангулация от първи и втори клас. При нея са допуснати доста неточности, предимно поради липсата на достатъчно геодезически наблюдения, както и недостиг на специалисти и измервателни инструменти (Минчев, Здравчев, & Георгиев, 2005).

През 50-те години, с цел да се приравнят координатните и височинните системи в съветския блок се въвежда системата „1950 г.“. По-късно, с помощта на нови триангулации от II-ри, III-ти и IV-ти клас, извършени в периода от 1957-1965 г., се въвежда нова координатна система - „1942 г.“.

През 80-те години се прави ново изравнение на държавата триангулация, което води до нови реализации на системите „1942 г.“ и „1950“ г. и въвеждането на системата „1970 г.“, която разделя страната на четири картографски зони. Параметрите на „1970 г.“ обаче остават засекретени, което в продължение на десетилетия предизвиква редица проблеми в геодезическата практика.

С навлизането на GNSS технологиите, нова съвременна геодезическа измервателна апаратура, както и на модерни CAD и ГИС софтуерни приложения, тези проблеми стават все по-осезателни и недопустими, и налагат въвеждане на нова единна референтна система, което се случва с изменение на Закона за

кадастъра и имотния регистър през 2001 г., като се въвежда Българска геодезическа система 2000 (БГС2000). (България. Министерски Съвет, 2001). Системата никога не се реализира, но създава предпоставка за създаването на националната GPS мрежа, което се случва в периода 2004 – 2005 г.

II. 3.1.2. Българска геодезическа система 2005 (БГС2005)

През 2010 г. в България се въвежда използването на нова координатна система - БГС2005 (България, МРРБ и МО, 2010). Като основна картографска проекция е дефинирана Универсална трансверзална проекция на Меркатор (UTM) и въведената чрез нея система от правоъгълни равнинни координати в две стандартни шестградусови зони (34N и 35N). През 2012 г. е обнародвана инструкцията за преобразуване на съществуващите геодезически и картографски материали и данни, налични в предходни координатни системи, към БГС2005. (България. МРРБ, 2012). В Приложение № 20 към чл. 28 от Инструкцията се въвежда Конформна конична проекция с два стандартни паралела, обхващаща цялата страна, наричана още „Кадастрална система“ (БГС2005-LCC).

II. 3.2. Анализ за деформации на картографските проекции към БГС2005

II. 3.2.1. Преглед на предходни научни изследвания

През 2014 г. П. Павлов и Т. Илиева публикуват изследване, в което разглеждат проблемите за трансформиране на данни от КС1970 година към проекциите на БГС2005 и отражението им върху площите на землищата от кадастралните карти (Павлов & Илиева, 2014). Извършен е сравнителен анализ с директна съпоставка на крайните стойности на площите на идентични полигонови обекти отчетени в различните равнинни координатни системи. Представени са индивидуални и комбинирани карти на грешките от трансформиране между различните проекции. Изводите показват, че при UTM проекциите към БГС2005 се получават по-големи разлики в площите, отколкото при БГС2005-LCC.

През 2024 г., Т. Бандрова и Т. Гюров представят доклад за изследване на избора на стандартните паралели на БГС2005-LCC (Bandrova & Gyurov, 2024). Изследвани са пет различни варианта на LCC проекция с два стандартни паралела, включително БГС2000, БГС2005-LCC и три нови проекции с параметри, изчислени съответно по метода на Еири и по методите с отстояние на 1/5 и 1/6 от екстремните географски ширини на страната. Сравнителен анализ спрямо елипсоида GRS80 показва най-ниски деформации за основния паралел при БГС2005-LCC и най-ниски деформации за граничните точки при метода с отстояние на стандартните паралели на 1/6 от тях, при който е регистрирано и най-равномерно разпределение на деформациите за територията на България. В резултат на проучването е предложена нова единна проекция за страната.

II. 3.2.2. Анализ на Универсалните трансверзални Меркаторови проекции към системата БГС2005

За да се направи анализ на деформациите в UTM проекциите за територията на България са набавени теренни данни от Геоложкия институт на САЩ (USGS), получени от проекта SRTM с резолюция 1“, редуцирани до мрежа от 444 000 точки с приблизително отстояние 500 m x 500 m с географски координати и височинни данни, изчислени от глобалния модел на геоида EGM2008 (φ , λ , h). Линейните деформации са изчислени чрез уравнение (17), в което мащабният фактор вследствие кривината на Земята k е получен посредством (Уравнение 25) (Dennis M. L., 2018):

$$k = k_0 \left\{ 1 + \frac{(\Delta\lambda \cos \varphi)^2}{2} \left(1 + \frac{e^2 \cos^2 \varphi}{1 - e^2} \right) \left[1 + \frac{(\Delta\lambda \cos \varphi)^2}{12} \left(5 - 4 \tan^2 \varphi + \frac{e^2 \cos^2 \varphi}{1 - e^2} (9 - 24 \tan^2 \varphi) \right) \right] \right\} \quad (25)$$

където k_0 - мащаб по стандартния меридиан на проекцията;

φ - географска ширина на всяка точка;

$e = \sqrt{e^2} = \sqrt{2f - f^2}$ - ексцентрицитет на референтния елипсоид;

f - сплеснатост на референтния елипсоид;

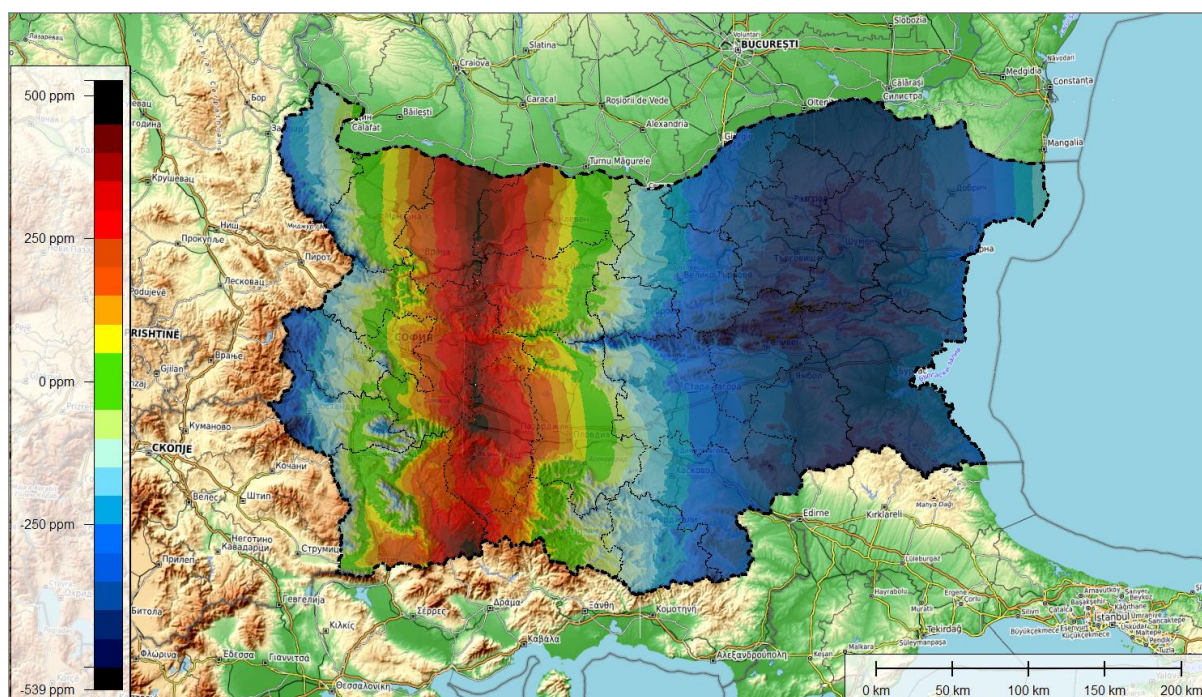
$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$;

λ - географска дължина на всяка точка;

λ_0 - географска дължина на основния меридиан.

В резултат е получен нов текстов файл за всички точки от мрежата със стойности (φ , λ , δ), където δ е линейната деформация на всяка точка, изчислена в част на милион (ppm). Този файл е въведен в ГИС за генериране на триизмерен полигонален (TIN) модел с оцветяване спрямо размера на деформациите в (δ). Този метод за визуално представяне на линейните деформации е използван за всички анализи в дисертационния труд.

На Фигура 57 е представена комбинирана карта на линейните деформации за UTM проекция за страната, включително двете зони 34N и 35N, като те са ограничени само в тяхната територия на покритие. Изготвен е и статистически анализ на получените резултати (Таблица 7) и е анализиран териториалният обхват на населението на България в различните степени на изкривяване със стъпка от ± 50 ppm (Таблица 8).



Фигура 57. Линейни деформации при БГС2005 - Зони 34N и 35N

Таблица 7. Комбинирана статистика за деформациите при БГС2005 (Зони 34N и 35N)

Деформации (ppm)	За цялата страна	За населените места
Минимална	-538.7	-478.5
Максимална	525.82	493.4
Средна ²	-144.8	-101.0
Медиана	-193.5	-194.0
Стандартно отклонение	261.3	238.7
Стандартна грешка	0.31	2.96

Таблица 8. Деформации при БГС2005 (Зони 34N и 35N) спрямо населението и територията на страната

Деформации (ppm)	За цялата страна	За населените места	
	Площ %	Население %	Площ %
$\leq \pm 50$	8.72%	7.88%	9.08%
$\pm 50 - \pm 100$	9.79%	19.81%	9.15%
$\pm 100 - \pm 150$	8.71%	11.52%	9.09%
$\pm 150 - \pm 200$	9.37%	9.00%	10.30%
$\pm 200 - \pm 250$	9.34%	9.88%	11.06%
$\pm 250 - \pm 300$	7.79%	5.57%	10.92%
$\pm 300 - \pm 350$	9.78%	13.51%	10.96%
$\pm 350 - \pm 400$	12.41%	11.78%	12.76%
$\pm 400 - \pm 450$	19.74%	10.07%	14.45%
$\pm 450 - \pm 500$	4.34%	0.98%	2.21%

² Средно претеглена стойност спрямо населението

От направената статистика е отчетено, че UTM проекциите към БГС2005 предоставят линейни деформации от ± 100 ppm (0.1 m/km) за около 18.5% от територията на страната и 18.2% от територията на населените места и обхващат 27.7% от населението. Според ширината на зоната и вариациите в релефа, линейните деформации при UTM проекцията достигат до около ± 500 ppm (0.5 m/km) за определени територии, като 36.5% от територията, 29.4% от населените места и 22.8% от населението попадат в зона на деформации над ± 350 ppm.

II. 3.2.3. Анализ на Ламбертова конформна конична проекция (Кадастрална система) към системата БГС2005

За БГС2005-LCC първо е изчислена географската ширина на централния паралел на проекцията ($\varphi_C = 42^\circ 40' 04.35246''$), както и мащабното число по централния меридиан ($k_0 = 0.999932552906433$). За изчисление на линейните деформации са използвани същите изходни данни и Уравнение (17), в което мащабният фактор вследствие кривината на Земята k за LCC проекция е изчислен посредством Уравнение (19) (Dennis M. L., 2019-a):

$$k = k_0 \frac{\cos \varphi_C}{\cos \varphi} \sqrt{\frac{1 - e^2 \sin^2 \varphi}{1 - e^2 \sin^2 \varphi_C}} \times \exp \left\{ \frac{\sin \varphi_C}{2} \left[\ln \frac{1 + \sin \varphi_C}{1 - \sin \varphi_C} - \ln \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + e \left(\ln \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} - \ln \frac{1 + e \sin \varphi_C}{1 - e \sin \varphi_C} \right) \right] \right\} \quad (19)$$

където k_0 - мащаб по стандартния паралел (когато е тангиращ с елипсоида $k_0 = 1$);

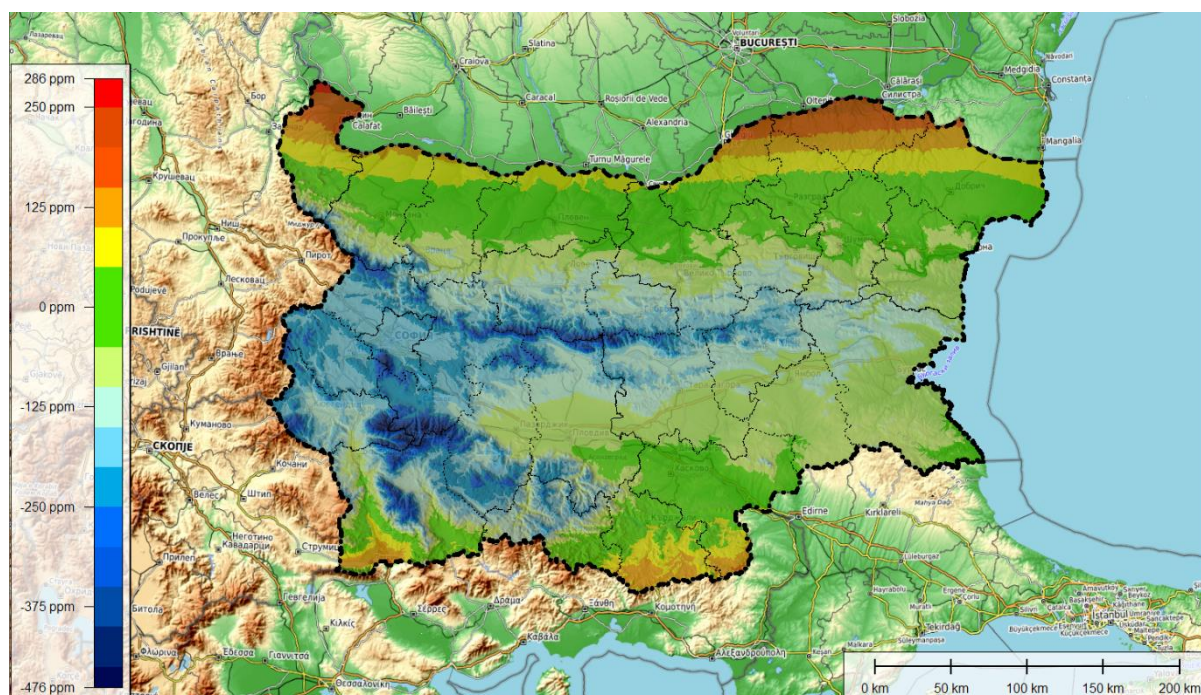
φ_C - географска ширина на стандартния паралел;

φ - географска ширина на всяка точката;

$e = \sqrt{e^2} = \sqrt{2f - f^2}$ - ексцентрицитет на референтния елипсoid;

f - сплеснатост на референтния елипсoid.

Карта с цветово оцветяване спрямо размера на деформациите е представена на Фигура 60. Изготвен е статистически анализ на получените резултати (Таблица 9). Също така е анализиран териториалният обхват на населението на България в различните степени на изкривяване със стъпка от ± 50 ppm (Таблица 10). От направената статистика е отчетено, че при БГС2005-LCC има линейни деформации от ± 100 ppm (0.1 m/km) за около 55.2% от територията на страната и 46.9% от населените места, и обхващат 58.4% от населението. Според ширината на зоната и вариациите в релефа, деформациите при тази проекция са от порядъка на -480 ppm (-0.48 m/km) до 290 ppm (0.29 m/km) за цялата територия, като 41.8% от територията, 52.4% от населените места и 41.3% от населението попадат в зони на деформации между ± 100 ppm и ± 250 ppm (± 0.10 - ± 0.25 m/km).



Фигура 60. Линејни деформации при БГС2005-LCC

Таблица 9. Комбинирана статистика за деформациите при БГС2005-LCC

Деформации (ppm)	За цялата страна	За населените места
Минимална	-476.2	-350.5
Максимална	285.8	274.7
Средна	-71.7	-69.1*
Медиана	-75.2	-72.9
Стандартно отклонение	107.2	95.7
Стандартна грешка	0.16	1.19

*Средно претеглена стойност спрямо населението

Таблица 10. Деформации при БГС2005-LCC спрямо населението и територията на страната

Деформации (ppm)	За цялата страна Площ %	За населените места Население %	Площ %
$\leq \pm 50$	24.81%	26.26%	21.19%
$\pm 50 - \pm 100$	30.38%	32.20%	25.75%
$\pm 100 - \pm 150$	18.68%	20.00%	26.32%
$\pm 150 - \pm 200$	14.50%	19.05%	19.16%
$\pm 200 - \pm 250$	8.68%	2.26%	6.94%
$\pm 250 - \pm 300$	2.21%	0.20%	0.63%
$\pm 300 - \pm 350$	0.59%	-	-
$\pm 350 - \pm 400$	0.14%	0.03%	0.02%

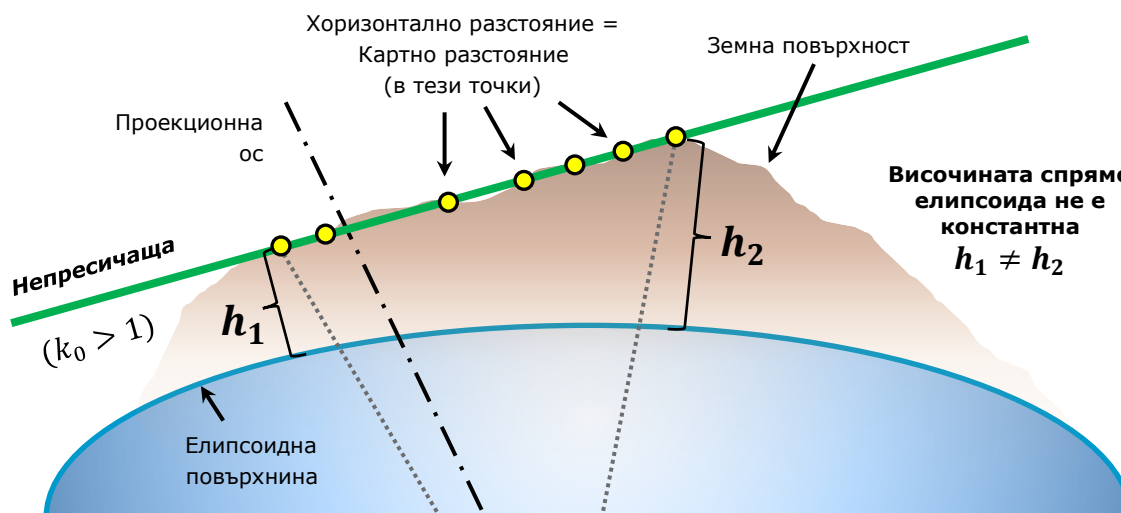
II. 3.2.4. Изводи от направените анализи

Демонстрирана е методология за оценка и анализ на съществуващи картографски проекции за техните линейни деформации спрямо физическата земна повърхност. Такъв тип анализ може да бъде от полза при избор на проекция за конкретен тип работа. От направените подробни анализи на UTM проекциите, както и на конформната конична проекция (Кадастрална система) в БГС2005 може да се направи извода, че така развитата методология за анализ на линейни деформации спрямо земната повърхност получава коректни данни и позволява да се изобразят нагледни резултати, които са визуално представени върху карта с помощта на ГИС софтуер.

Тъй като анализите са направени на ниво физическа земна повърхност, а не на ниво елипсоид, се забелязва, че зоните с относително ниски линейни деформации в диапазон до ± 50 ppm не са непременно съвпадащи с основните проекционни оси на различните проекции към БГС2005. Направените анализи потвърждават първоначалната хипотеза, че коничната проекция към система БГС2005 има по-ниски линейни деформации спрямо UTM проекциите, предвид формата на държавата и поради факта, че UTM проекцията е глобална система и не е предназначена за локално картографиране.

II. 4. МЕТОДИКА ЗА СЪЗДАВАНЕ НА НОВИ КАРТОГРАФСКИ ПРОЕКЦИИ С МИНИМАЛНИ ДЕФОРМАЦИИ СПРЯМО ЗЕМНАТА ПОВЪРХНОСТ

За да се намалят линейните деформации на проекциите до нива, при които разстоянията, отчетени в координатната система спрямо тези, измерени на физическата земна повърхност, са пренебрежимо малки, е необходимо да се създадат проекции с ниски линейни деформации (LDP). Обикновено критерий от ± 20 ppm (2 cm/km) задоволява изискванията за висока точност.



Фигура 62. Комбиниран метод за редуциране на линейните изкривявания спрямо земната повърхност (<https://geodesy.noaa.gov/>)

Съществуват различни методи за редуциране на линейните деформации спрямо физическата земна повърхност (Dennis M. L., 2019-b):

- 1) Премащабиране на елипсоида – използва се често в практиката, но крие своите недостатъци, тъй като се въвежда нов датум за всяка една нова проекция;
- 2) Премащабиране на проекцията – осъществява се чрез „преместване“ на картната равнина върху земната повърхнина с промяна на мащабното число на проекцията. Също има недостатъци и е приложим за сравнително малка територия на покритие;
- 3) Третият метод включва промяна на мащаба, както и промяна на централната проекционна ос, нейното изместване и/или ориентация. С помощта на този метод може да се „напасне“ картната равнина, така че да описва максимално добре локалния терен (Фигура 62). Именно този подход се използва за проектирането на SPCS2022 в САЩ.

Метод (3) включва шестстепенен процес за проектиране (Dennis M. L., 2019-b):

Стъпка 1. Определяне на обхвата - ясно дефиниране на географската област, която ще бъде покрита от проекцията, в това число събиране на необходимите геопространствени данни и информация за топографията и инфраструктурата на региона. В тази стъпка се вземат предвид критериите за максимална деформация (δ_0) спрямо ширината на зоната на интерес и средна елипсоидна височина (h_0);

Стъпка 2. Избор на подходящ тип проекция – спрямо определената целева област се избира конформна проекция, която е най-подходяща за постигане на оптимални нива на деформациите. Могат да бъдат избрани за изследване един или повече видове от четирите основни конформни картографски проекции (Таблица 2);

Стъпка 3. Избор на местоположение и мащаб за проекционната ос - централната проекционна ос се избира така, че картната равнина да е максимално близо до земната повърхност (Фигура 62) в целевият обхват. Проекционната ос се поставя приблизително в геометричния център на зоната и се избира мащабен фактор спрямо средната наделипсоидна височина;

Стъпка 4. Оценка на деформациите за цялата зона на проектиране - включва подробен анализ на деформациите в проекцията. Извършват се симулации и сравнения с алтернативни проекционни конфигурации за да се оцени степента на деформация в различни дискретни точки, като се правят корекции и оптимизации на проекционните параметри, докато се постигне най-

ниска възможна деформация за конкретната територия на обхват. Създават се карти на деформациите и се извеждат статистически данни за всеки проектен вариант;

Стъпка 5. Прецизиране на параметрите - след като се избере окончателен проектен вариант на проекция се прави опростяване на параметрите ѝ с цел лесно въвеждане в софтуерни приложения. Избира се координатно начало със стойности на ординатата и абсцисата по централния меридиан и паралел;

Стъпка 6. Въвеждане на проекцията – посочват се мерни единици и геодезическа референтна система (датум). Изготвя се изчерпателно представяне на параметрите на проекцията с всички метаданни и карта на разпределение на деформациите.

II. 5. РАЗРАБОТВАНЕ НА НОВИ КООРДИНАТНИ СИСТЕМИ С НИСКИ ЛИНЕЙНИ ДЕФОРМАЦИИ ЗА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ

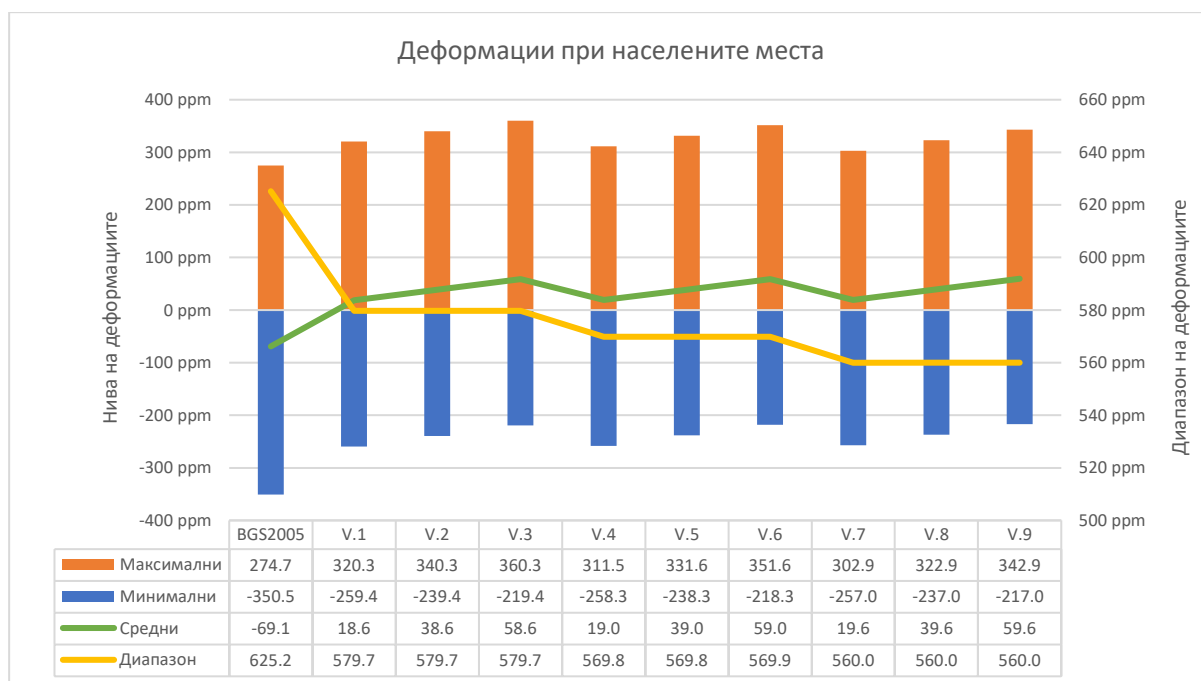
Изготвен е идеен проект за нова геодезическа референтна система за територията на България, включваща система от картографски проекции с ниско линейно изкривяване и тяхното привързване към най-актуалните към момента геодезически референтни системи (датиуми) в Европа. Предложено е тя да бъде именувана Българска геодезическа система 2025 (БГС2025).

II. 5.1. Проекция за цялата страна

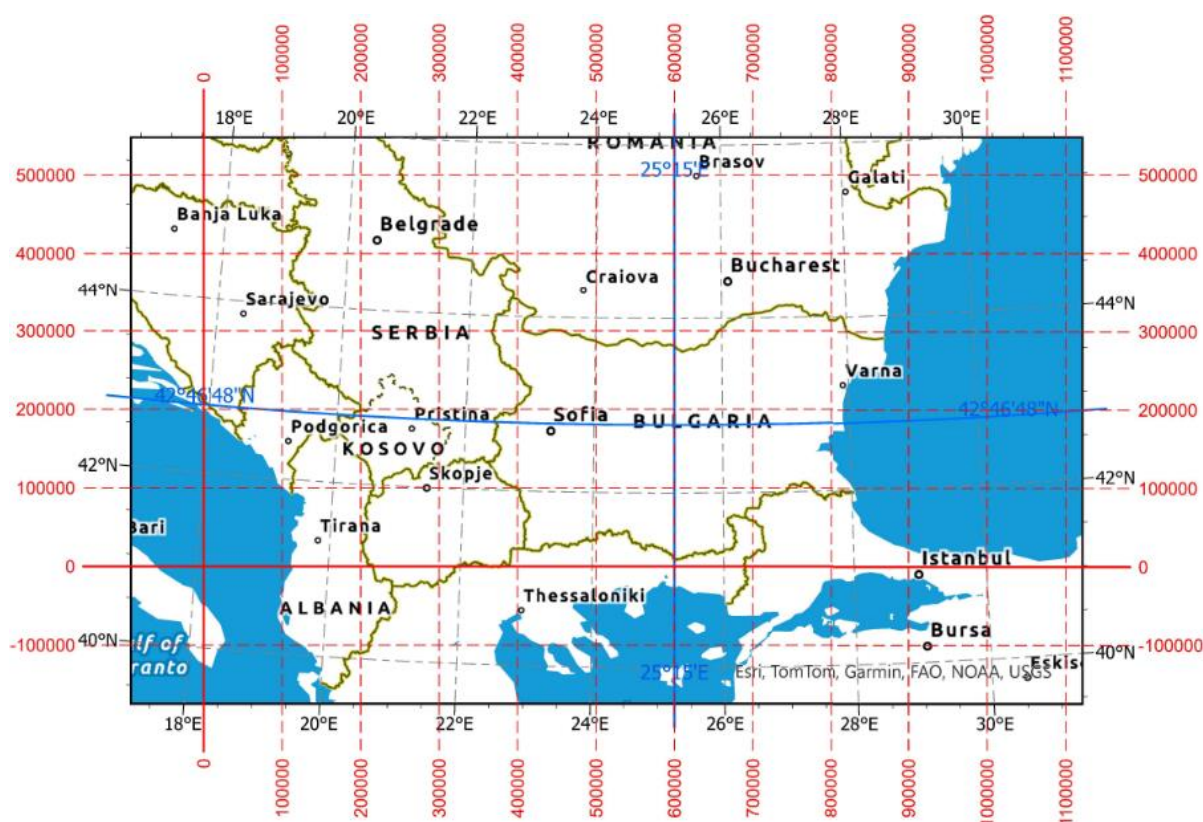
Разгледана е възможността за създаване на нова, оптимизирана единна конична проекция, която да осигурява по-ниски деформации за страната спрямо БГС2005-LCC и в частност при по-големите населени места. Първоначално са изследвани деформациите при градовете с по-голямо население.

Изследването показва, че с отместване на централния паралел в посока север, постепенно намалява диапазонът на деформациите и с увеличаване на мащабното число техните стойности се изменят към положителни числа. Извършен е сравнителен анализ (Фигура 81) на деформациите при девет различни варианта на LCC проекции с един стандартен паралел с карти на разпределение на деформациите и статистически оценки. В резултат е избрана нова Ламбертова конформна конична (LCC) проекция за цялата страна със следните параметри:

- Централен паралел: $\varphi_0 = 42^\circ 46' 48''$ (42.78°);
- Мащабно число: $k_0 = 1.000002$;
- Централен меридиан: $\lambda_0 = 25^\circ 15' 00''$ (25.25°);
- Условен изток: $E_0 = 600\,000\text{ m}$;
- Условен север: $N_0 = 180\,000\text{ m}$.



Фигура 81. Деформации за населените места в България при различните варианти на проекции



Фигура 84. Окончателни параметри за равнинните координати

II. 5.2. Проекции с ниски линейни деформации (LDP) за територията на България

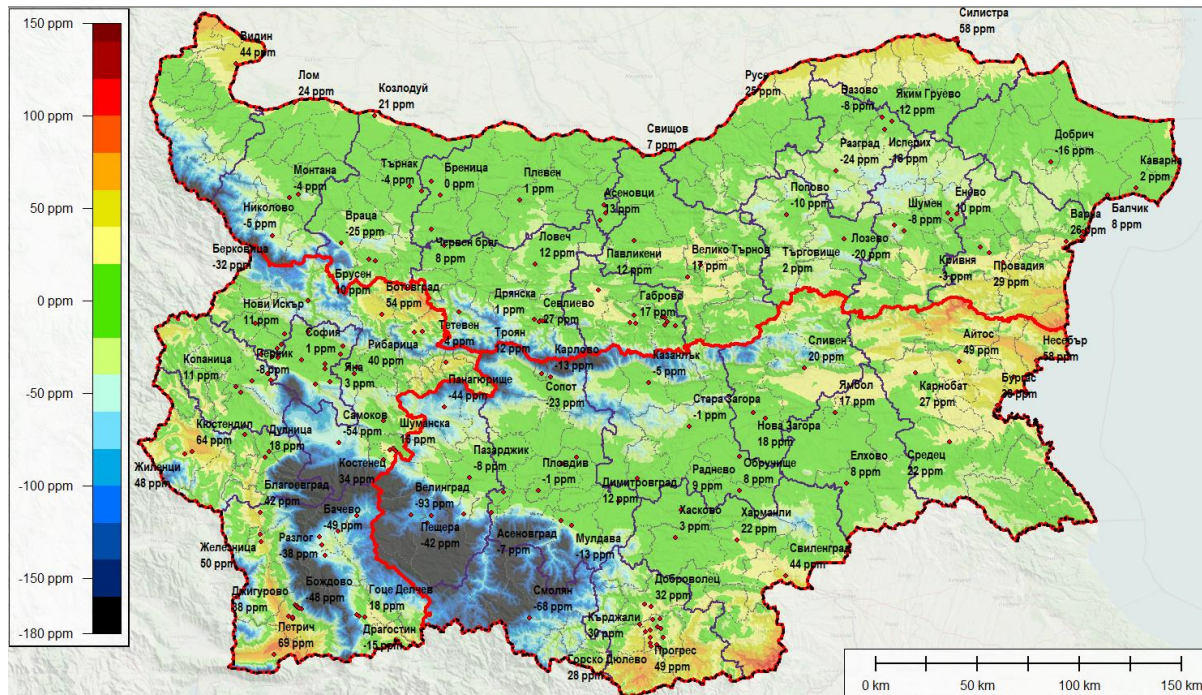
След като са намерени оптималните параметри за картографска проекция, която да обхваща цялата територия на страната, е разгледана и възможността за създаване на втори слой от картографски проекции, които да обхващат цялата страна, но с по-малки зони на покритие и съответно с по-ниски линейни деформации. За основна хипотеза е прието, че с намаляване големината на зоните могат да се достигнат по-ниски нива на изкривяване, които да са подходящи за инженерни и геодезически дейности.

За експеримент на изследване се зададе разработване на серия от картографски проекции с ниски линейни деформации с целеви критерий от ± 20 ppm (2 cm/km), който да покрива следните условия: 90% от населението; 75% от населените места (само въз основа на местоположението и размера им, независимо от населението) и 50% от цялата територия на зоната.

Разгледани са три различни варианта на слоеста система, които обхващат територията на цялата страна със съответно 3, 4 и 6 зони.

II. 5.2.1. Вариант 1 – Слой с три картографски проекции (зони)

Първо е разгледана възможността на въвеждане на три нови проекции за страната, като тя се раздели на три географски зони (Фигура 97). За всяка зона са направени серии от анализи за различни проектни варианти.

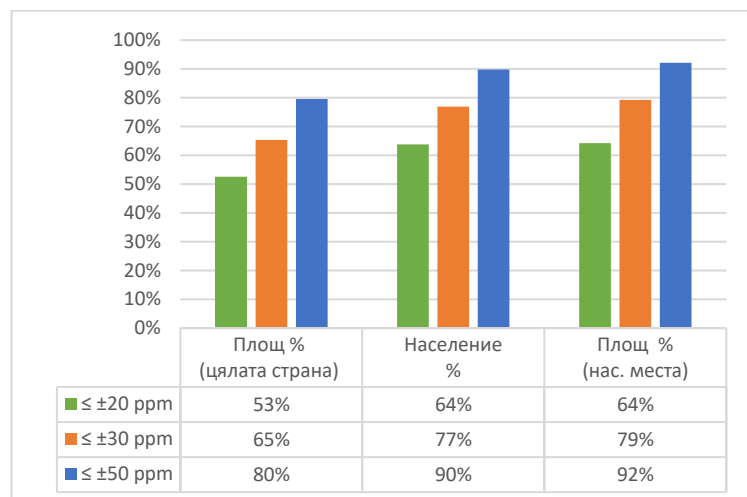


Фигура 97. Комбинирана карта на деформациите при Вариант 1 (три LDP зони)

Първата, Югозападна зона се избира да съвпада с Югозападния район на развитие към МРРБ, а именно да обхваща областите София (град), София (област), Перник, Кюстендил и Благоевград.

Най-добро представяне се отчете при ТМ проекция с параметри $\lambda_C = 23.40^\circ$ и $k_0 = 1.0001$. За Северната и Югоизточната зона са обследвани вариации на Ламбертова конформна конична проекция (LCC) с един стандартен паралел. За Северната зона най-добро общо представяне се отчете при проекция с параметри $\varphi_C = 43.54^\circ$ и $k_0 = 1.000025$, а при Югоизточната зона $\varphi_C = 42.19^\circ$ и $k_0 = 1.000032$.

Фигура 97 представя комбинирана карта на деформациите за цялата страна при Вариант 1 с трите LDP проекции. Фигура 94 дава комбинирана оценка за цялата страна при Вариант 1.



Фигура 98. Оценка на деформациите за цялата страна при Вариант 1 (три LDP зони)

Направеният анализ доказва основната хипотеза, че с намаляване големината на зоните се достигат по-ниски нива на деформации спрямо използване на единна проекция за цялата страна.

II. 5.2.2. Вариант 2 – Слой с четири картографски проекции (зони)

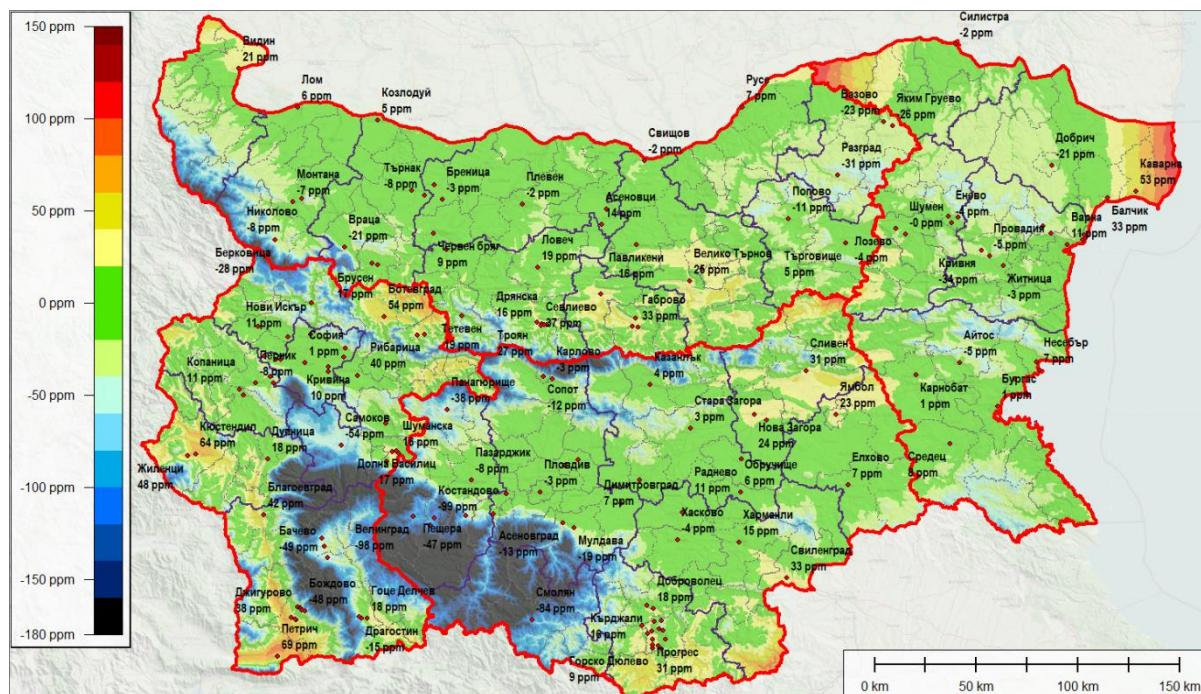
При втория вариант на проектиране е направен експеримент, при който се въвежда четвърта (Източна) зона, която да обхваща източните области в страната (област Силистра, Добрич, Шумен, Варна и Бургас). Запазва се Югозападната зона от Вариант 1, съответно Северната зона ставна по-къса в посока изток-запад и се образува още една нова Южноцентрална зона.

При всички зони (без Югозападната, която остава без промяна) са обследвани множество параметри на проекции. Запазена е същата методология на работа както при предходния вариант. За всяка зона са избрани по четири варианта с различни параметри, които дават добри резултати за деформации при населените места, след което за всяка от тези четири зони е извършен пълен статистически анализ и изготвена карта на деформациите.

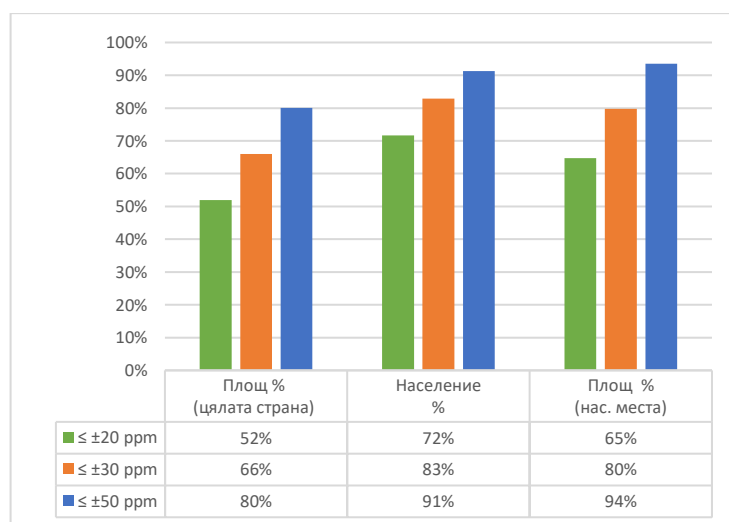
След направена оценка и съпоставка на резултатите са избрани окончателни варианти на проекция за всяка една зона със следните параметри:

- Югозападна: (TM) – $\lambda_C = 23.40^\circ$, $k_0 = 1.000100$
- Северозападна: (LCC) – $\varphi_C = 43.65^\circ$, $k_0 = 1.000016$
- Южноцентрална: (LCC) – $\varphi_C = 42.11^\circ$, $k_0 = 1.000030$
- Източна: (TM) – $\lambda_C = 27.51^\circ$, $k_0 = 1.000010$

Фигура 100 представя комбинирана карта на деформациите при четирите зони на проектиране при Вариант 2. Обобщена статистика за деформациите при Вариант 2 за цялата територия на страната е показана на Фигура 102.



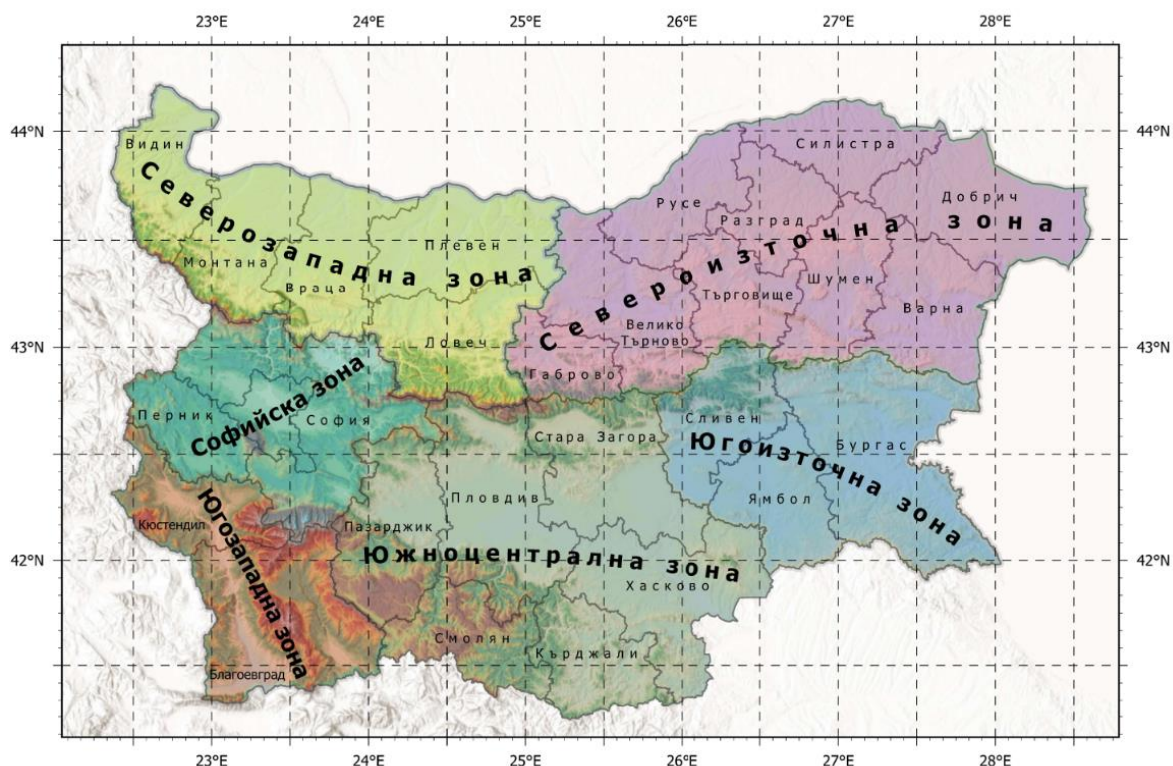
Фигура 100. Комбинирана карта на деформациите при Вариант 2 (четири LDP зони)



Фигура 102. Оценка на деформациите за цялата страна при Вариант 2 (четири LDP зони)

II. 5.2.3. Вариант 3 – Слой с шест картографски проекции (зони)

При третия вариант за втори слой от проекции с ниско изкривяване (LDP) към новопредложената система БГС2025 е разгледана възможността за допълнително намаляване на проекционните зони с цел постигане на по-ниски нива на деформации и доближаване към целевите критерии на проектиране с диапазон на изкривяване от ± 20 ppm. Територията на държавата е разделена на шест зони (Фигура 103).



Фигура 103. Зони на проектиране при трети вариант на LDP за България

При първата зона - „**Софийска координатна система**“, са обследвани различни параметри на Ламбертова конична (LCC) и Трансверзална Меркаторова (TM) проекции. За окончателен вариант в този експеримент се избира LCC проекция с параметри $\varphi_c = 42.86^\circ$ и $k_0 = 1.000105$.

За втората зона - „**Северозападна координатна система**“, първо са проучени различни варианти на Ламбертова конична (LCC) проекция, след което са тествани и параметри на Наклонена Меркаторова проекция (OM), която е избрана за окончателен вариант с параметри $\varphi_c = 43.60^\circ$, $\lambda_c = 23.46^\circ$, $\alpha_c = -76.40^\circ$ и $k_0 = 1.0001$.

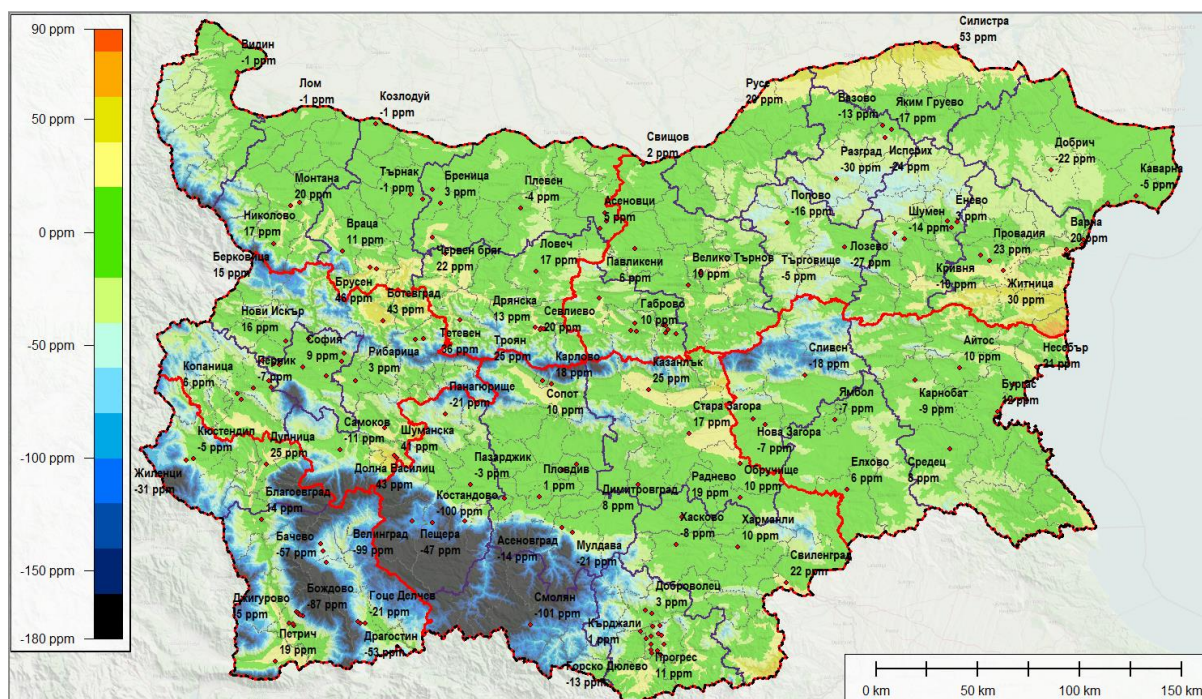
При третата зона - „**Североизточна координатна система**“, са проучени различни параметри на Ламбертова конична (LCC) проекция с вариации както в географската ширина на централния паралел (φ_c : 43.24° - 43.60°), така и в мащабното число (k_0 : 1.000019 – 1.000031). За окончателен вариант е избрана LCC проекция с параметри $\varphi_c = 43.53^\circ$ и $k_0 = 1.000019$.

При Зона 4 – „Югозападна координатна система“, въпреки че това е най-малката по площ зона, тя е и тази с най-пресечен релеф. Първоначално са изследвани серия от параметри на Трансверзална Меркаторова (ТМ) проекция, тъй като зоната е по-удължена в посока север-юг. Представянето на тази ТМ проекция обаче не достига желаните условия за целевия критерий на проектиране, поради това допълнително е изследвани LCC и Наклонена Меркаторова (ОМ) проекции с множество итерации, като най-ниски нива на деформации за населените места са регистрирани при ОМ проекция с параметри: $\varphi_C = 41.20^\circ$, $\lambda_C = 23.62^\circ$, $\alpha_C = -53^\circ$ и $k_0 = 1.000055$.

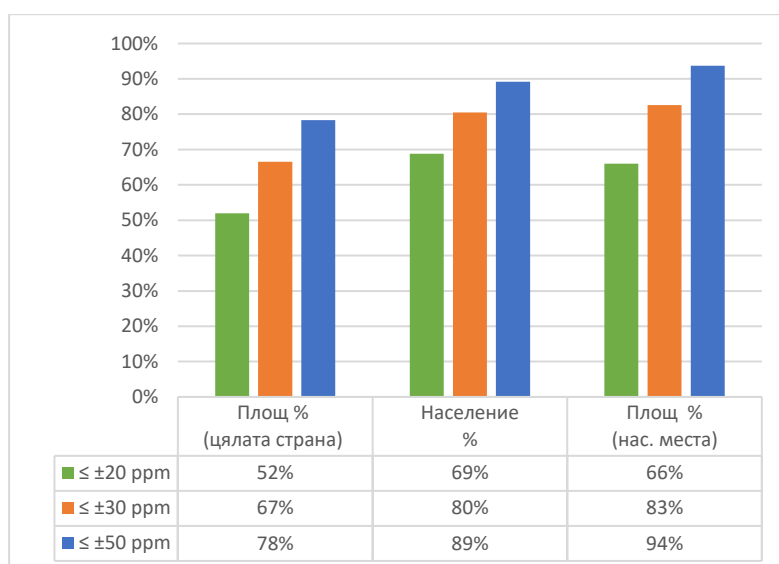
При петата зона – „Южноцентрална координатна система“, са изследвани различни параметри на Ламбертова конична (LCC) проекция с вариации както в географската ширина на централния паралел (φ_C : $41.78^\circ - 42.26^\circ$), така и в мащабното число (k_0 : $0.999990 - 1.000110$). За окончателен вариант е избрана LCC проекция с параметри $\varphi_C = 41.99^\circ$ и $k_0 = 1.000030$.

За Зона 6 – „Югоизточна координатна система“, отново са проучени различни вариации на Ламбертова конична (LCC) проекция с различни стойности за географската ширина на централния паралел (φ_C : $42.26^\circ - 42.74^\circ$), така и в мащабното число (k_0 : $1.000010 - 1.000070$). За окончателен вариант е избрана LCC проекция с параметри $\varphi_C = 42.42^\circ$ и $k_0 = 1.000020$.

Фигура 125 представя комбинирана карта на деформациите за цялата страна при Вариант 3, а Фигура 126 дава комбинирана оценка за цялата страна.



Фигура 125. Комбинирана карта на деформациите при Вариант 3 (шест LDP зони)



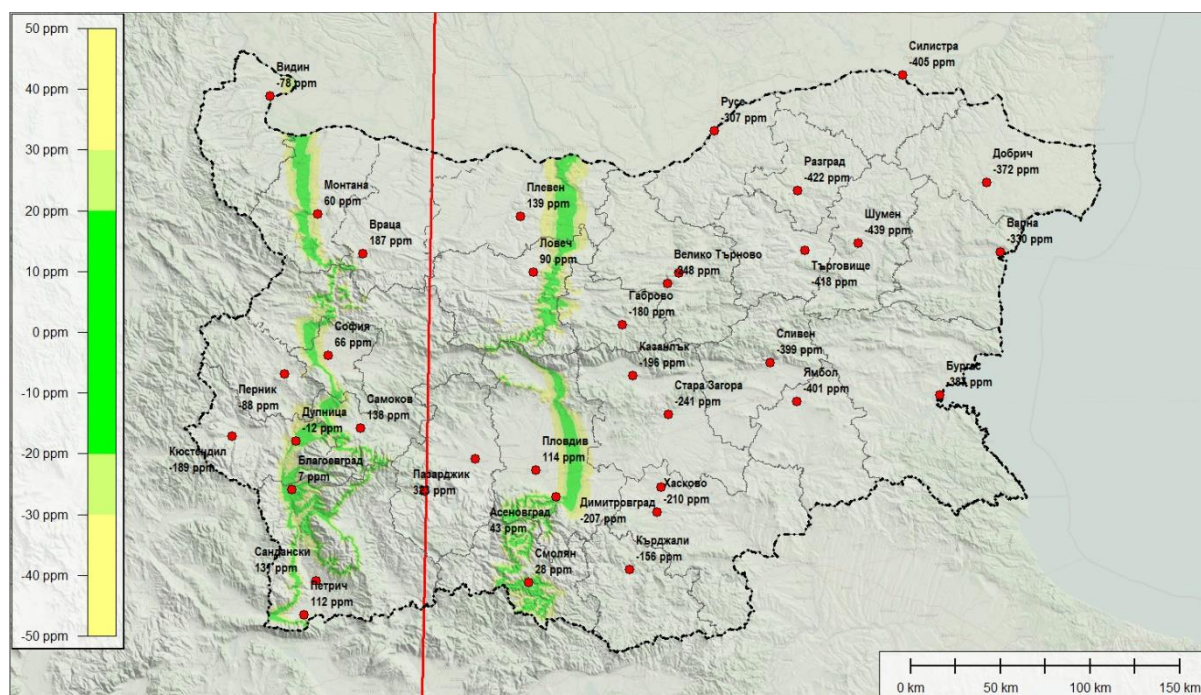
Фигура 126. Оценка на деформациите за цялата страна при Вариант 3 (шест LDP зони)

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ

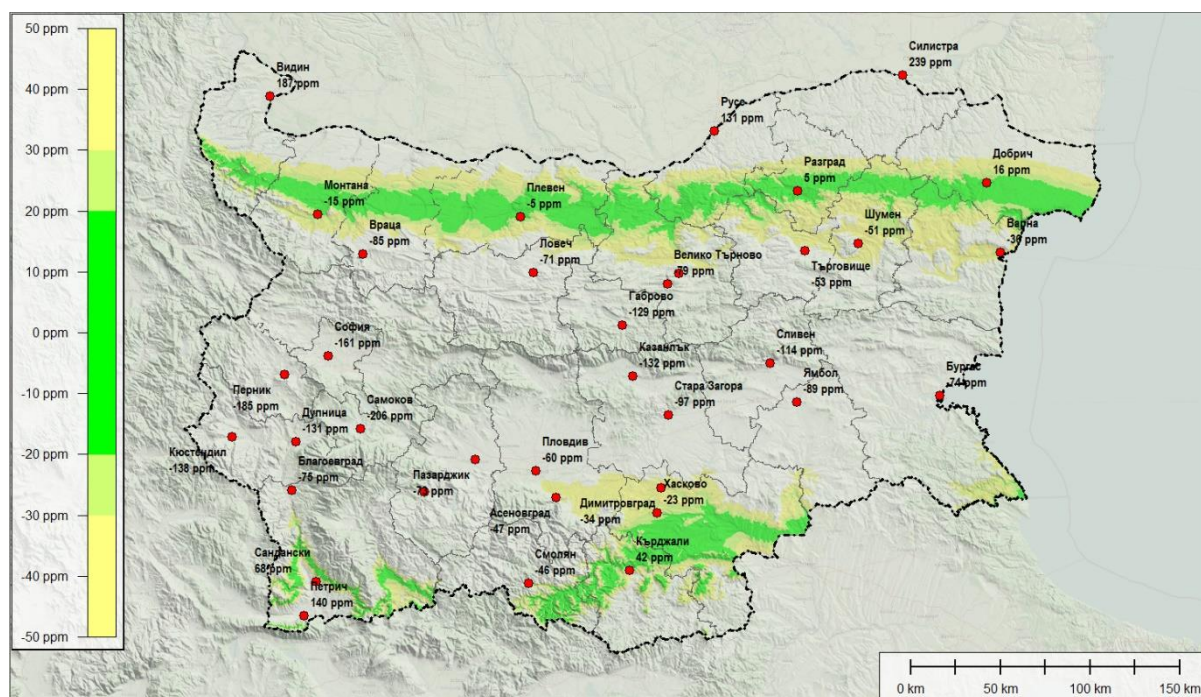
Обект на изследване в този дисертационен труд са картографските проекции, и по-специално тези, които са с най-широко приложение в практиката по геодезия, кадастър и инвестиционно проектиране. Основната цел на дисертацията е да се демонстрира иновативен подход за разработване на картографски проекции, съдържащ методология за изследване на деформациите им спрямо физическата земна повърхност, както и тяхното визуално и статистическо представяне с помощта на съвременни ГИС приложения за работа с триизмерни пространствени данни. Подробно е представена цялата техническа информация, необходима за анализ и оценка на деформациите при различните видове картографски проекции и е описана приложената методика за работа.

III. 1. Обобщен анализ на направените изследвания и резюме на получените резултати

Направен е теоретичен анализ на деформациите при проекциите към съществуващата система БГС2005, които се използват официално в страната. Анализът включва оценка на деформациите при различните проекции (UTM и LCC) за цялата територия на страната, както и за всички населени места. Направен е изводът, че така развитата методология за анализ на линейни деформации спрямо земната повърхност получава коректни данни и позволява да се възпроизведат нагледни резултати, които могат да бъдат визуално представени върху карта с помощта на ГИС софтуер. Фигура 123 и Фигура 124 илюстрират зоните на покритие с ниски линейни деформации от ± 20 , ± 30 и ± 50 ppm при проекциите към системата БГС2005.



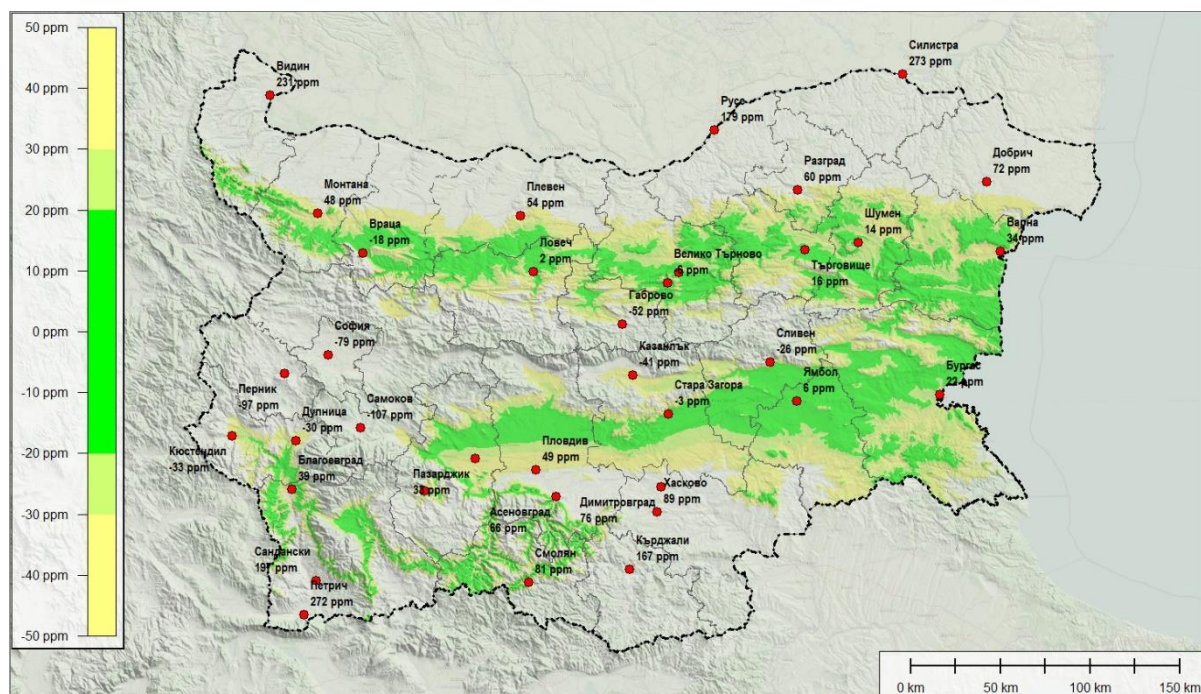
Фигура 128. Деформации от ± 20 , ± 30 и ± 50 ppm за територията на България при БГС2005-UTM



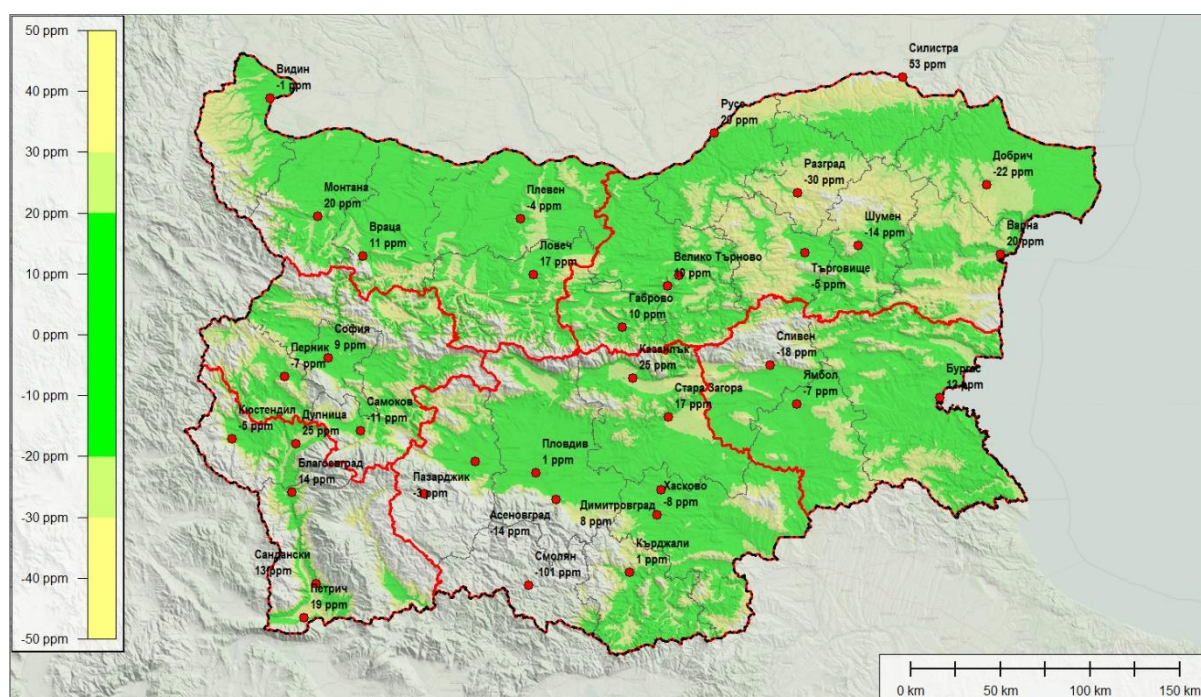
Фигура 129. Деформации от ± 20 , ± 30 и ± 50 ppm за територията на България при БГС2005-LCC

Установени са нивата на линейните изкривявания за цялата територия на страната, както и за големите градове. Направените анализи потвърдиха първоначалната хипотеза в тази част, че коничната проекция към система БГС2005 (Кадастрална система) има по-ниски линейни деформации спрямо UTM проекциите. Въпреки това, при коничната проекция покритието на страната с ниски линейни деформации остава относително слабо и се отчете необходимостта от оптимизирането ѝ, за да се редуцират деформациите в населените райони.

В пилотно изследване е предложено въвеждането на нова геодезическа координатна система за България, условно именувана Българска геодезическа система 2025 (БГС2025). Върху нея е разработена нова оптимизирана конична конформна проекция, осигуряваща по-ниски нива на деформациите за цялата територия на страната спрямо съществуващата БГС2005-LCC. Зоните на покритие с ниски линейни деформации от ± 20 , ± 30 и ± 50 ppm при новата проекция (БГС2025) са илюстрирани на Фигура 130.



Фигура 130. Деформации от ± 20 , ± 30 и ± 50 ppm за територията на България при новопроектираната LCC проекция (БГС2025)



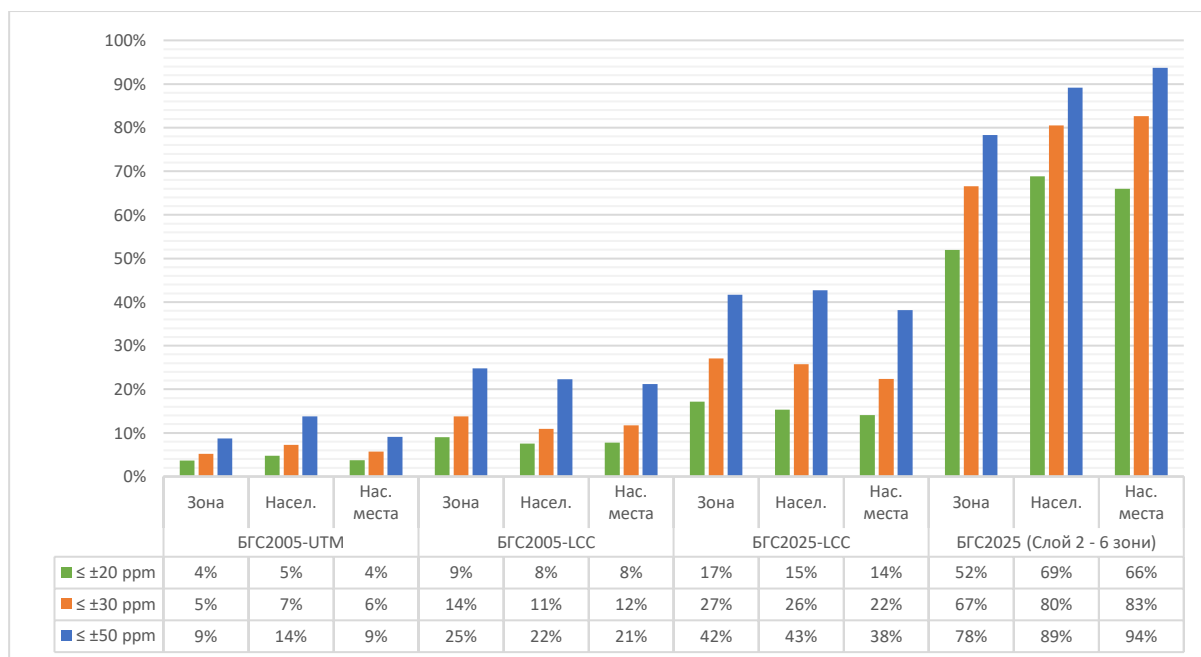
Фигура 131. Деформации от ± 20 , ± 30 и ± 50 ppm за територията на България при новопроектираните шест зони (БГС2025 - Слой 2)

Допълнително е изследвана и възможността за въвеждане на „слоеста“ система с втори допълнителен слой от картографски проекции, обхващащи цялата територия на България съответно с три, четири и шест зони. И при трите варианта са получени значително по-ниски нива на деформациите спрямо текущата БГС2005-LCC и новопроектираната БГС2025, както за цялата страна, така и за населените места. Фигура 131 илюстрира покритието с ниски линейни деформации от ± 20 , ± 30 и ± 50 ppm при Вариант 3 – шест LDP проекции.

III. 2. Изводи и препоръки

III. 2.1. Изводи

- Предложена е методология за създаване на картографски проекции и изследване на деформациите им, която използва иновативен подход и модерни софтуерни средства. Тази методология има реално приложение в практиката и може да се използва от професионалистите по геодезия при избор на подходяща проекция за работа или проектиране на нова система, отговаряща на специфични нужди и изисквания;
- Направеният идеен проект за система от картографски проекции, демонстрира възможността за въвеждане на „слоеста“ система за територията на България. Фигура 132 показва сравнение на статистическите данни за деформациите от ± 20 , ± 30 и ± 50 ppm при различните картографски проекции от БГС2005 и новите предложени варианти (БГС2025). Може да се заключи, че зоналното покритие на страната (Вариант 3 – шест проекции) е категорично в пъти по-добро от всеки един друг изследван вариант на единна проекция за цялата страна;



Фигура 132. Сравнение между статистическите данни за деформациите между различните картографски проекции за България

- С намаляване на зоната на обхват в планинските райони не е ясно кой тип проекция би дал най-добри резултати, съответно и диапазонът на параметри за изследване става по-голям;

- Методиките и методологиите, описани в този дисертационен труд, могат да бъдат добавени в образователната програма на студентите по геодезия и картография и да се състави ръководство за упражнения като допълнителен учебен материал, който да е в полза на всички професионалисти по геодезия и картография, както и всички други заинтересовани лица.

III. 2.2. Препоръки

- Да се въведе нова система от картографски проекции за България с по-ниски нива на деформациите спрямо текущата БГС2005;

- Да се използват два слоя с картографски проекции за страната: първи - с единна проекция обхващаща цялата ѝ територия, и втори - с множество проекции с по-ниски деформации;

- При новата система да се използват най-актуалните геодезически референтни системи (датиуми) в Европа, съответно да се преизмери или преизравни държавната GPS мрежа и създаде нов геоиден модел за страната;

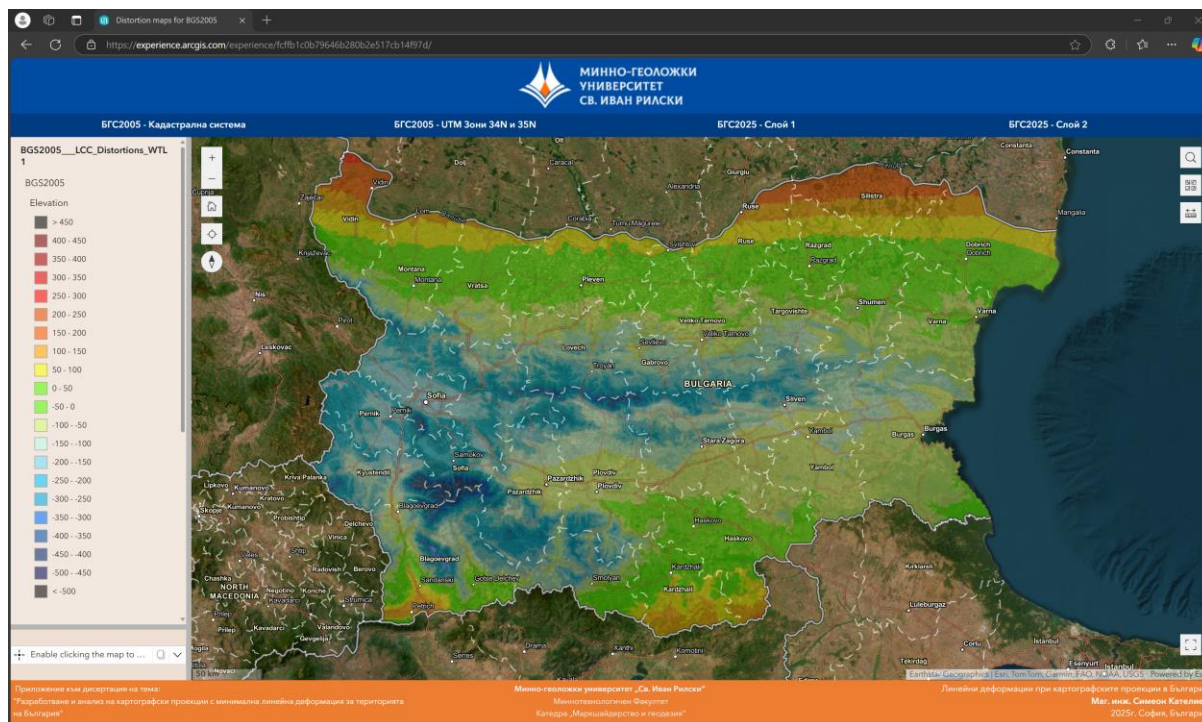
- Да се извършат последващи анализи и изследвания за проекции с ниски деформации с допълнително намаляване на техните зони на обхват и възможност за разделение по географски характеристики с цел да бъдат постигнати зададените целеви критерии на проектиране;

- Да се заложат условия и приоритети на проектирането на нова координатна система в страната, които да се съгласуват със съответните административни органи и заинтересовани страни.

III. 2.3. Приложения:

За картографските проекции, изследвани в този дисертационен труд, включително съществуващите UTM и LCC проекции към системата БГС2005, както и за новопроектираните в условно именуваната система „БГС2025“, са приложени подробни карти на деформациите в част ПРИЛОЖЕНИЯ. За всяка новопроектирана система е приложен и пример за пълното ѝ въвеждане с всички необходими параметри на проекцията.

Приложените карти на деформациите могат да бъдат разпечатани на хартиен носител и да служат за справка на ползвателите на тези координатни системи при избор на картографска проекция за техните конкретни нужди. Допълнително са създадени и веб-базирани карти на деформациите. Картите са публикувани онлайн и общодостъпни за използване чрез веб-браузър на компютър или мобилно устройство (Фигура 133). Интернет адресът за достъп е: <https://experience.arcgis.com/experience/fcffb1c0b79646b280b2e517cb14f97d/>



Фигура 133. Уеб-базирани карти на деформациите за БГС2005 и БГС2025

IV. ПРЕТЕНЦИИ ЗА ПРИНОСИ

IV. 1. Научни приноси

- I. Представена е иновативна методология за оценка и анализ на деформации на картографски проекции спрямо физическата земна повърхност.
- II. Представена е методика за създаване на нови картографски проекции с ниски линейни деформации спрямо физическата земна повърхност.

IV. 2. Научно-приложни приноси

- III. Извършен е цялостен сравнителен анализ на деформациите при картографските проекции от Българска геодезическа система 2005 (БГС2005).
- IV. Разработен е идеен проект за нова геодезическа референтна система за територията на България - „Българска геодезическа система 2025 (БГС2025)“.

V. СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- 1) Кателиев, С. (2023). Модернизирани национални пространствени референтни системи в САЩ (NSRS2022). *Геодезия, картография, земеустройство* (5-6), стр. 3-14. ISBN 0324-1610.

- 2) Кателиев, С. (2025). Метод за изчисление на деформациите при конформни картографски проекции. *Геодезия, картография, земеустройство* (1-2). ISBN 0324-1610. (Приета за печат).
- 3) Кателиев, С. (2025). Приложение на иновативен метод за анализ на деформациите при картографските проекции от системата БГС2005. *Геодезия, картография, земеустройство* (3-4). ISBN 0324-1610. (Приета за печат).

VI. ЛИТЕРАТУРА (Кирилица)

- Бандрова, Т. (2022). *Картни проекции*. София: Университет по архитектура, строителство и геодезия.
- България, МРРБ и МО. (2010). *Наредба № 2 от 30-ти Юли 2010 г. за дефиниране, реализация и поддържане на българската геодезическа система*. ДВ.
- България. Министерски Съвет. (2001). *Постановление №140 на Министерския съвет от 04.05.2001 г. се въвежда Българска геодезическа система 2000 (БГС 2000)*. Министерски Съвет.
- България. МРРБ. (2012). *Инструкция № РД-02-20-12 от 03-ти Август 2012 г. за преобразуване на съществуващите геодезически и картографски материали и данни в „Българска геодезическа система 2005“*. ДВ.
- Милев, Г., & Милев, И. (2017). *„Приложна Геодезия – Част 1: Инженерна Геодезия“, Книга 1 - Основи, Системи и Технологии в Инженерната Геодезия*. София, България: Съюз на геодезистите и земеустроителите в България.
- Минчев, М., Здравчев, И., & Георгиев, И. (2005). *Основи на приложението на GPS в геодезията*. Университет по архитектура, строителство и геодезия: София.
- Павлов, П., & Илиева, Т. (11 Септ. 2014 г.). *Точност на площите на землищата от кадастралната карта при трансформиране от координатна система 1970 в Българска геодезическа система 2005*. Извлечено от Списание Геомедия: <https://www.geomedia.bg/geodesia/tochnost-na-ploshtite-na-zemlishatata-ks1970-kam-bgs2005/>

VII. ЛИТЕРАТУРА (Латиница)

- Bandrova, T., & Gyurov, T. (2024). *Standard parallels choice for Lambert conformal conic projection for Bulgaria - BGS2005*. Nessebar, Bulgaria: Bulgarian Cartographic Association.

- Dennis, M. (2023). *The Future is Here: Introducing the State Plane Coordinate System of 2022*. Orlando, FL: FIG.
- Dennis, M. L. (2016). *Ground Truth: Low Distortion Map Projections for Engineering, Surveying, and GIS*. School of Civil and Construction Engineering.
- Dennis, M. L. (2018). *NOAA Special Publication NOS NGS 13: The State Plane Coordinate System, History, Policy, and Future Directions*. NOAA National Geodetic Survey (NGS).
- Dennis, M. L. (2019-b). *Ground Truth for the Future Low Distortion Projections and the State Plane Coordinate System of 2022*. Broken Arrow, OK: Oklahoma Society of Land Surveyors.
- Dennis, M. L. (2019-a). *DISSERTATION: Map Projections and Differential Leveling in a GNSS-based 3D Geodetic Framework*. Oregon State University.
- NGS. (2023). *Procedures for Design and Modification of the State Plane Coordinate System of 2022*. National Geodetic Survey.
- NGS. (2023). *State Plane Coordinate System of 2022 Policy*. National Geodetic Survey.
- NGS. (2024). *NSRS Modernization*. Retrieved from <https://www.ngs.noaa.gov/datums/newdatums/index.shtml>
- Smith, D. (2010). *Improving the National Spatial Reference System*. Executive Steering Committee of NGS.
- Smith, D., Ahlgren, K., Caccamise, D., Childers, V., Damiani, T., Dennis, M., . . . Jalbrzikowski, J. (2021). *NOAA Technical Report NOS NGS 64; Blueprint for the Modernized NSRS, Part 2: Geopotential Coordinates and Geopotential Datum*. Silver Spring, MD: NOAA's National Geodetic Survey (NGS).
- Smith, D., Armstrong, M., Caccamise, D., Choi, K., Cline, M., Craymer (GSC), M., . . . Zenk, D. (2021). *NOAA Technical Report NOS NGS 62: Blueprint for the Modernized NSRS, Part 1: Geometric Coordinates and Terrestrial Reference Frames*. Silver Spring, MD: NOAA's National Geodetic Survey (NGS).
- US Federal Register. (2020). *2020-21902 (85 FR 62698) Deprecation of the United States (U.S.) Survey Foot*. US Federal Register.

VIII. SUMMARY

of a dissertation named "DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF MAP PROJECTIONS WITH MINIMAL LINEAR DISTORTION FOR THE TERRITORY OF BULGARIA"

The primary objective of this dissertation is the development and analysis of map projections with minimal linear distortion for the territory of Bulgaria. This involves a comprehensive scientific study of existing map projections in the country and the development of new ones using a modernized design approach.

The main aim is to develop a set of new projections that optimize and reduce the linear distortions in the country, particularly in populated areas. This effort seeks to enhance coordinate systems in Bulgaria and support professional applications in geodesy, infrastructure design, cadastral mapping, and numerous other fields.

The following tasks have been formulated:

- I. Clarification of the definitions related to map projections and their distortions.
- II. Justification of the essence and significance of the research subject.
- III. Review of the modernized reference systems and map projections developed in the USA.
- IV. Study of existing map projections in Bulgaria and analyze the current state of their distortions relative to the Earth's surface for the entire territory of the country, including an evaluation of the need for their optimization.
- V. Presentation of a methodology for creating new map projections with minimal linear distortions relative to the Earth's surface. This includes describing the process and tools for design and research.
- VI. Development of new map projections for Bulgaria with lower linear distortions compared to the existing systems, providing a detailed description of the methodology and a complete analysis of distortion distribution across design zones and urban areas.

The primary focus of this scientific work is the map projections used in Bulgaria, as stipulated by the country's regulatory framework. These projections underpin every engineering activity and are essential for determining the areas and locations of real estate. The following research questions have been posed:

- 1) What are the distortions of the map projections officially used in Bulgaria relative to the Earth's surface?
- 2) Can new map projections be developed with optimized reliability and accuracy to support geodetic measurements, engineering design, and cadastral mapping in the country?