



**СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
“СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ”**

**Физически факултет
Катедра “Атомна физика”**

ДИПЛОМНА РАБОТА

Тема:

“Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACONTM. Анализ на резултатите.”

Дипломант: **Благовест Викторов Младенов**
Специалност: **ЯТЯЕ, Ф.№ 6РН3700002**

Дипломен ръководител: **инж.-физ. Веселин Лефтеров – Уестингхаус Електрик Швеция АБ, клон България**

Консултант: **доц. д-р Христо Илиев**

София, 2025 год.

Съдържание

Съдържание	2
Списък на фигурите:	3
Списък на таблиците:	4
Списък на използваните означения	5
1. Увод	6
1.1 Цели на дипломната работа:	6
1.2 Използвани източници	6
1.3 Обобщение на дейностите	6
2. Основна информация за Система за Вътрешно-Реакторен Контрол (СВРК)	8
2.1 Технически изисквания към СВРК	8
2.2 Общо описание и функции на СВРК при ВВЕР-1000	9
3. Общо описание на СВРК-М	11
3.1 Програмно и техническо осигуряване на системата – „ниско“ и „високо“ ниво ..	11
3.2 Основно оборудване на система – датчици и разположението им	12
3.3 Измерване, обработване и трансфер на информация	15
3.4 Възстановяване на параметрите на енергоотделяне на активната зона	19
3.5 Параметри на енергоотделяне на системата	20
4. Общо описание на софтуерна платформа BEACON	21
4.1 Общо описание на модулите на платформата. Операционни нива на системата BEACON.	21
4.2 Основно описание на аналитичните модели, използвани за оценка на енергоотделянето на а.з.	24
4.2.1 Основна задача при прилагане на ANC-H и PHOENIX-H във ВВЕР	24
4.2.2 Конформност на изображенията за уравнението на дифузия	24
4.2.3 Нодални пресмятания с ANC-H	26
4.2.4 Вътрешно-нодални представяния	29
4.3 Използвани входни данни в платформата	31
4.3.1 Мониторинг на активната зона с помощта на КНИ	31
4.3.2 Изгаряне на В-10	32
5. Описание на методиката за извършване на сравнението	34
6. Резултати от сравнението и анализ на резултатите	37
6.1 Резултати от сравнението	37
6.2 Анализ на резултатите от сравненията	39
7. Заключение	40
8. Списък с използваната литература	41
9. Приложение 1	43

Списък на фигурите:

Фигура 3-1 Картограма на разположението на КНИ, ОР СУЗ и термодвойки в активната зона на ВВЕР-1000.[16]	14
Фигура 3-2 Основна схема на ДПЗ (детектор пряк заряд).[13]	17
Фигура 3-3 Микросечения на радиационно залавяне на ¹⁰³ Rh. [14]	18
Фигура 3-4 Пример на корекциите на неутронния поток след отстраняване на закъснението в сигнала.[12]	19
Фигура 4-1 Конформно изображение на правоъгълник в шестоъгълник. [15]	25
Фигура 5-1 Снимка на част от един изходен файл от програмата за сравняване. Първите шест реда са поясняващи. На фигурата е само част от картограмата.	35
Фигура 9-1. Сравнение на дълбочина на изгаряне (BU) по касети при 270 ефективни денонощия.	43
Фигура 9-2. Сравнение на K_q по касети при 270 ефективни денонощия.	44
Фигура 9-3. Сравнение на K_r по касети при 270 ефективни денонощия.....	45
Фигура 9-4. Сравнение на K_v по касети, слой 1, при 270 ефективни денонощия.....	46
Фигура 9-5. Сравнение на K_v по касети, слой 2, при 270 ефективни денонощия.....	47
Фигура 9-6. Сравнение на K_v по касети, слой 3, при 270 ефективни денонощия.....	48
Фигура 9-7. Сравнение на K_v по касети, слой 4, при 270 ефективни денонощия.....	49
Фигура 9-8. Сравнение на K_v по касети, слой 5, при 270 ефективни денонощия.	50
Фигура 9-9. Сравнение на K_v по касети, слой 6, при 270 ефективни денонощия.....	51
Фигура 9-10. Сравнение на K_v по касети, слой 7, при 270 ефективни денонощия.....	52
Фигура 9-11. Сравнение на дълбочина на изгаряне (BU) по касети при 300 ефективни денонощия.	53
Фигура 9-12. Сравнение на K_q по касети при 300 ефективни денонощия.	54
Фигура 9-13. Сравнение на K_r по касети при 300 ефективни денонощия.....	55
Фигура 9-14. Сравнение на K_v по касети, слой 1, при 300 ефективни денонощия.....	56
Фигура 9-15. Сравнение на K_v по касети, слой 2, при 300 ефективни денонощия.....	57
Фигура 9-16. Сравнение на K_v по касети, слой 3, при 300 ефективни денонощия.....	58
Фигура 9-17. Сравнение на K_v по касети, слой 4, при 300 ефективни денонощия.....	59
Фигура 9-18. Сравнение на K_v по касети, слой 5, при 300 ефективни денонощия.....	60
Фигура 9-19. Сравнение на K_v по касети, слой 6, при 300 ефективни денонощия.....	61
Фигура 9-20. Сравнение на K_v по касети, слой 7, при 300 ефективни денонощия.....	62
Фигура 9-21. Сравнение на дълбочина на изгаряне (BU) по касети при 330 ефективни денонощия.	63
Фигура 9-22. Сравнение на K_q по касети при 330 ефективни денонощия.	64
Фигура 9-23. Сравнение на K_r по касети при 330 ефективни денонощия.....	65
Фигура 9-24. Сравнение на K_v по касети, слой 1, при 330 ефективни денонощия.....	66
Фигура 9-25. Сравнение на K_v по касети, слой 2, при 330 ефективни денонощия.....	67
Фигура 9-26. Сравнение на K_v по касети, слой 3, при 330 ефективни денонощия.....	68
Фигура 9-27. Сравнение на K_v по касети, слой 4, при 330 ефективни денонощия.....	69
Фигура 9-28. Сравнение на K_v по касети, слой 5, при 330 ефективни денонощия.....	70
Фигура 9-29. Сравнение на K_v по касети, слой 6, при 330 ефективни денонощия.....	71
Фигура 9-30. Сравнение на K_v по касети, слой 7, при 330 ефективни денонощия.....	72

Списък на таблиците:

Таблица 6-1. Стойности на максимално и минимално отклонение, абсолютно максимално отклонение и стандартно отклонение за сравнените параметри на енергоотделяне.	37
Таблица 6-2. Стойности на максимално и минимално отклонение, абсолютно максимално отклонение и стандартно отклонение за сравненото изгаряне.	38

Списък на използваните означения

АЕЦ	Атомна електроцентрала
а.з.	Активна зона
АЗ	Аварийна защита
ГЕ	Горивен Елемент
ДПЗ	Датчик/детектор с пряк заряд
КНИ	Канал за неутронно измерване
НФ	Неутронно-физични (параметри)
ОР	Органи за регулиране
ПТК-ВУ	Програмно-технически комплекс – високо ниво
ПТК-НУ	Програмно-технически комплекс – ниско ниво
ПЗ	Предупредителна защита
СВРК	Система за вътрешно-реакторен контрол
СУЗ	Система за управление и защита
ТВСА	Горивна касета, произведена от „ТВЕЛ“
ТОК	Горивна Касета
ТХ	Термо-хидравлични (параметри)
BEACON	Best Estimate Analysis of Core Operations – Nuclear
DNBR	Запас до кризис на топлообмена
IEC	International Electrotechnical Commission
RWFA	Robust Westinghouse Fuel Assembly
AFD	Axial Flux Difference
ASI	Axial Shape Index

BEACON™ е регистрирана търговска марка на Westinghouse Electric Company LLC, нейните филиали и/или техните дъщерни дружества в Съединените Американски Щати и може да бъде регистрирана в други държави по целия свят. Всички права запазени.

1. Увод

1.1 Цели на дипломната работа:

- Да се представи системата за вътрешно-реакторен контрол (СВРК) за реактор тип ВВЕР-1000;
- Да се представи софтуерната платформа BEACON;
- Да се извърши сравнение между параметри на енергоотделяне, получени от СВРК-М и BEACON;
- Да се представят резултати от сравнението на експлоатационни параметри от СВРК-М и BEACON;
- Да се извърши анализ на резултатите от сравнението.

1.2 Използвани източници

За целите на дипломната работа са използвани:

- Технически изисквания на АЕЦ Козлодуй и свързаните с тях нормативни документи;
- спецификации на софтуерната платформа BEACON;
- спецификации на софтуерната платформа СВРК-М;
- неутронно-физични характеристики на реактор ВВЕР-1000;
- други източници, конкретизирани в списъка на използваната литература.

1.3 Обобщение на дейностите

ВВЕР-1000 използва измервателни прибори за измерване на неутронен поток от активната зона, с които да възстанови разпределението на енергоотделянето. От възстановеното разпределение на енергоотделянето, оперативния персонал получава информация за състоянието на активната зона. Системата, изградена от „ниско“ и „високо“ нива за обработка на сигналите от измервателните прибори в активната зона („ниско“ ниво), и възстановяване на полето на енергоотделяне („високо“ ниво), се нарича система за вътрешнореакторен контрол (СВРК).

Софтуерните системи разгледани в настоящата дипломна работа, СВРК-М, разработена от „Курчатовский институт“, и BEACONTM, разработена от Уестингхаус, използват различни софтуерни модели за възстановяване на полето на енергоотделяне, въз основа на данните от СВРК. Двете софтуерни системи са сравнени чрез разлики в резултатите от възстановените от тях параметри на енергоотделянето в активната зона.

За сравнението на СВРК-М и BEACON са генерирани параметри на енергоотделяне от всяка от програмите, след това генерираните резултати са сравнени с помощта на допълнителни софтуерни приложения. Приложенията са разработени от Уестингхаус, за целите на проекта за внедряване на BEACON в бл. 5 на АЕЦ Козлодуй, и служат за *валидация* на BEACON чрез сравнение с данни от СВРК-М. Софтуерните приложения са преминали през вътрешните процедури за валидация и верификация на Уестингхаус.

Резултатите от сравненията на данни между BEACON и СВРК са съпоставени с критериите за приемливост, дефинирани в проекта за внедряване на BEACON в бл. 5 на АЕЦ Козлодуй. Съответните критерии за приемливост, както и данните за сравнението с тях *не са* представени в настоящата дипломна работа от съображения за *конфиденциалност на данните от АЕЦ Козлодуй*. От същите съображения (*конфиденциалност на данните от АЕЦ Козлодуй*), резултатите от сравненията на данни от СВРК-М и BEACON са представени единствено чрез *относителни разлики* в настоящата дипломна работа.

2. Основна информация за Система за Вътрешно-Реакторен Контрол (СВРК)

2.1 Технически изисквания към СВРК

Изискванията на АЕЦ Козлодуй към СВРК присъстват в техническото задание, Референция 1, на обществената поръчка: “*Замяна на програмно-технически комплекс горно ниво (ПТК-ВУ) на системата за вътрешнореакторен контрол (СВРК) на 5 ЕБ и доставка на комплекса програми АРА-Н (ALPHA-Н, PHOENIX-Н, ANC-Н)*“.

Според техническото задание, за осигуряване на надеждна работа на СВРК на 5 блок, при работа с касети ТВСА и RWFA, в смесена зона и безопасна експлоатация на реактора, е необходимо съществуващите изчислителни устройства на ПТК-ВУ (високо ниво) на СВРК, и софтуерът да се модифицират или подменят с нови. Те от своя страна трябва да осигурят в пълен обем функциите на СВРК и да удовлетворят изискванията на Технологичния регламент, във всички проектни режими на работа на реактора. В случая е доставено ново хардуерно и софтуерно осигуряване от страна Уестингхаус, за софтуерната платформа BEACONTM.

Проектът на оборудването и софтуерната платформа отговарят на приложимите норми и стандарти на българското законодателство, представени в раздел 2.3.8.1 на Реф. 1, както и на приложимите международни такива. Конкретно, съгласно Референция 1, приложимите към СВРК на АЕЦ Козлодуй международни норми и стандарти, за оборудването и софтуерната платформа, обект на тази дипломна работа са както следва:

- SSG-39 Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants, Реф. 2;
- IEC 61225:2019 Nuclear power plants - instrumentation, control and electrical power systems – Requirements for static uninterruptible DC and AC power supply systems, Реф. 3;
- IEC 6 1226:2020 Nuclear power plants - Instrumentation, control and electrical power systems important to safety - Categorization of functions and classification of systems (IEC 61226:2020), Реф. 4;
- БДС EN IEC 62138:2020 Ядрени централи. Апаратура и управление на системи ,

важни за безопасността. Аспекти на софтуера за компютърни базови системи характеризиращи изпълнението на функциите за категория В или С (IEC 62138:2018), Реф. 5;

- IEEE Std 730-2014 IEEE Standard for Software Quality Assurance Processes, Реф. 6;
- IEEE Std 830- 1998 Recommended Practice for Software Requirements Specifications, Реф. 7;
- IEEE Std 1012TM-2016, IEEE Standard for System Software, and Hardware Verification and Validation, Реф. 8;
- IEEE Std 1016TM-2009 IEEE Standard for Information Technology-Systems Design Software Design Descriptions, Реф. 9;
- ISO/IEEE 12207 - Systems and software engineering – Software life cycle processes, Реф. 10;

2.2 Общо описание и функции на СВРК при ВВЕР-1000

Съгласно референция [11] за експлоатацията на един енергетичен реактор е необходимо да бъде познато разпределението на енергоотделянето в активната зона, в идеалния случай, за всеки момент от време. При познато разпределение на енергоотделянето, коефициентите на неравномерност за активната зона могат да бъдат изчислени, след което да бъдат съпоставени с критерии за дадена АЕЦ.

В идеалния случай, една система за вътрешнореакторен контрол е съставена от възможно най-много детектори за неутронен поток с възможно най-малък обем. Още едно условие е ексклузивната чувствителност на детекторите към неутрони, поради това че неутронния поток е пропорционален на енергоотделянето.

Реалните детектори използвани за ВРК на ВВЕР-1000, имат чувствителност само към неутрони. Използват се бета-емисионни детектори за неутрони, още известни като „датчици с пряк заряд“ (ДПЗ). ДПЗ съдържа елемент или изотоп в централния електрод, такъв че след поглъщане на неутрон да е нестабилен в отношение на бета-разпад, в следствие на което да излъчи бета-частица. Тези бета-частици попадат върху колектора и индуцират ток, който е пропорционален на неутронния поток. За централния електрод на ДПЗ за ВВЕР-1000 обикновено се използва родий.

В активната зона има 64 комплекта за контрол на неутронния поток (КНИ), разположени в 64 горивни касети. Един КНИ се състои от 7 броя ДПЗ разположени на равни разстояния един от друг по височината на горивната касета. Така измерването е достъпно в 448 точки на зоната. Оборудването на СВРК е описано в глава 3.2.

За да възстановим разпределението на енергоотделянето, решаваме дифузионното уравнение и нормираме неутронния поток в елементарни обеми (*нодове*) с помощта на измерените от ДПЗ стойности.

3. Общо описание на СВРК-М

3.1 Програмно и техническо осигуряване на системата – „ниско“ и „високо“ ниво

Според Техническото задание [1], СВРК е изградена от ниско ниво (ПТК НУ) и високо ниво (ПТК ВУ). Ниското ниво извършва:

- приемане на сигнал;
- предварителна обработка на сигнала;
- преобразуване от аналогов в цифров вид;
- проверка сигнали от датчиците от състава на СВРК, общоблочните датчици, характеризиращи състоянието на активната зона на реактора , първи и втори контур на реакторната инсталация;
- отстраняване на закъсненията на тока от ДПЗ;
- формиране и подаване в АЗ/ПЗ на сигнали за предупредителната защита по линейно енергоотделяне от ТОЕ и запас до кризиса на топлообмен;
- предаване на приети и обработени сигнали във високото ниво на СВРК;

Високото ниво (ПТК ВУ) има следните основни функционалности, още действащи като изисквания към проекта [1]:

- осъществява контрол на енергоотделянето и неговото разпределение в активната зона;
- осъществява контрол на разпределението на плътността на неутронния поток;
- извършва определяне (оценка) на топлинната мощност на реактора;
- определя дълбочина на изгаряне на горивото по касети, с оценка натрупаните шлаки;
- осъществява контрол на термо-хидравлични (ТХ) и неутронно-физични (НФ) параметри и показатели на състоянието на активната зона на реактора. На термохидравличните параметри от първи и втори контур, в обема необходим за решаване на задачите на СВРК;
- автоматично създава архив на данните с възможност за извеждането му за печат (по зададени параметри/променливи и време) на мрежовите принтери и на мониторите на ПТК-ВУ, във вид на видеограми, протоколи и диаграми,

както и записването на архива във файлове по зададен шаблон;

- извършва разчетно моделиране на текущото състояние на реактора за решаване задачите на оперативно прогнозиране;
- създава възможност за коригиране на коефициентите за свързване на линейното енергоотделяне с токовете на ДПЗ (коефициенти на чувствителност на ДПЗ);
- определя поправки за изчисляване на температурата;
- създава възможност за подготовка и проверка правилността на въвеждане на данни и параметри за ново горивно зареждане.

Описаните функционалности на ПТК-ВУ в пълния им вид се намират в референция [1].

3.2 Основно оборудване на система – датчици и разположението им

Според реф. 12 и 13 системата за вътрешно-реакторен контрол (СВРК) се състои от следната апаратура и алгоритми:

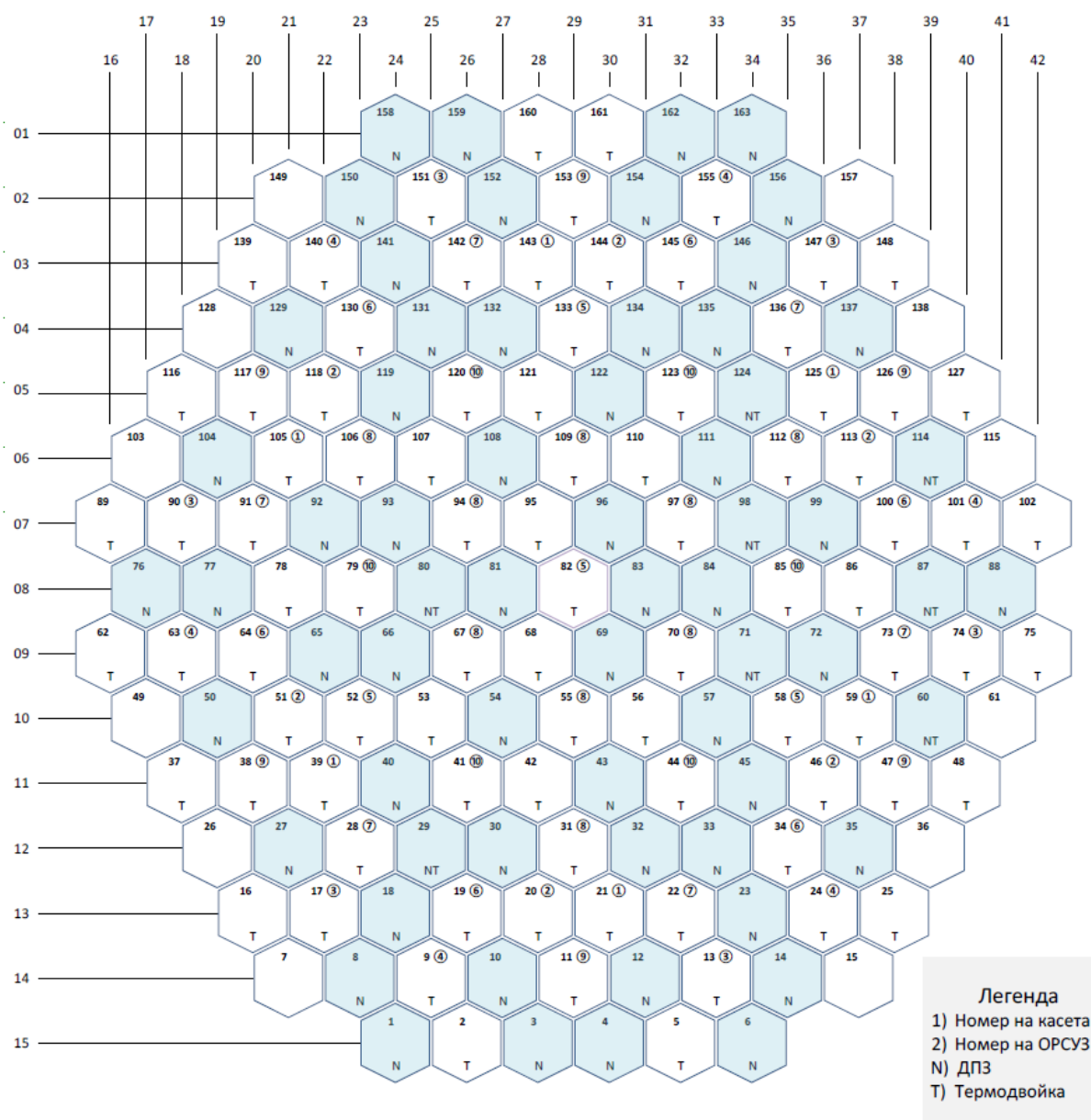
- Датчици пряк заряд за измерване на неутронния поток (ДПЗ);
- Температурни датчици за измерване на температурата на горната част на касетите (95 бр.);
- Датчици за мониторинг на положението на органите за регулиране;
- Датчици за измерване на концентрацията на борна киселина;
- Датчици за измерване на налягане на топлоносителя по първи и втори контури;
- Апаратура за събиране и първично обработване на информацията, в сървърен шкаф (ниско ниво);
- Алгоритми за възстановяване на полето на енергоотделяне, изпълнявани от апаратура в сървърен шкаф (високо ниво).

Както е пояснено в раздел 2.2 по-горе, в активната зона на ВВЕР-1000 има 64 комплекта за контрол на неутронния поток (КНИ). Един КНИ се състои от 7 датчици с пряк заряд (ДПЗ) равномерно разпределени по височината на касетата в сухи канали. Според реф. [12], *проектното* разстояние между ДПЗ в каналите е 44.4 [см].

На Фигура 3-1 по-долу (фигурата е заимствана от реф. [16]) е представена *примерна картограма* на разпределението на датчиците на СВРК в активната зона на ВВЕР-1000.

Означенията на фигурата са както следва:

- (N) Касета със 7 ДПЗ разположени по височина на касетата;
- (T) Касета с термодвойка разположена в топлоносителя в горния край на активната зона;
- (NT) Касета с ДПЗ и термодвойка, комбинирани.



Фигура 3-1 Картограма на разположението на КНИ, ОР СУЗ и термодвойки в активната зона на ВВЕР-1000.[16]

3.3 Измерване, обработване и трансфер на информация

Според реф. [12], сумарната топлинна мощност P_{th} на реактора се пресмята като претеглената сума на пет начина за оценка:

$$P_{th} = \frac{\sum_i N_i w_i}{w_i} \quad 1$$

Където w_i - е теглото на оценка i ; N_i - топлинната мощност на реактора в метод за оценка i .

- 1) По първият метод, мощността N_1 е изчислена от измерванията на йонизационните камери, които са част от апаратурата за мониторинг на неутронния поток;
- 2) Втория метод оценява N_2 от сигналите получени от ДПЗ;
- 3) Оценките за мощността N_3 и N_4 се взимат от данни получени от датчици от втори контур – по параметри на подхранваща вода и подгреватели високо налягане;
- 4) Оценката N_5 се изчислява от параметрите на топлоносителя в активната зона.

Всеки един от тези методи включва неопределеност. Систематични отклонения причинени от повреди в датчиците или апаратурата, или при грешка в измервания и тн., са отстранени в началото на горивната кампания, за да се избегне субективно определяне на теглата на горепосочените методи.

Според реф. [12], измерване, обработване и трансфер на информация във високото ниво на СВРК става за 1 [s]. Методите приложени в ниското ниво предоставят следните параметри свързани с надеждността на системата:

Минимални стойности на средното време между грешки на системата (в часове):

- 1) Формиране на сигнал за защита по запас до криза на топлообмена (DNBR):
 - а. Сигнал за „фалшиво“ сработване: 1.7E+06;

б. Липса на сигнал за оценка: $2.7E+11$;

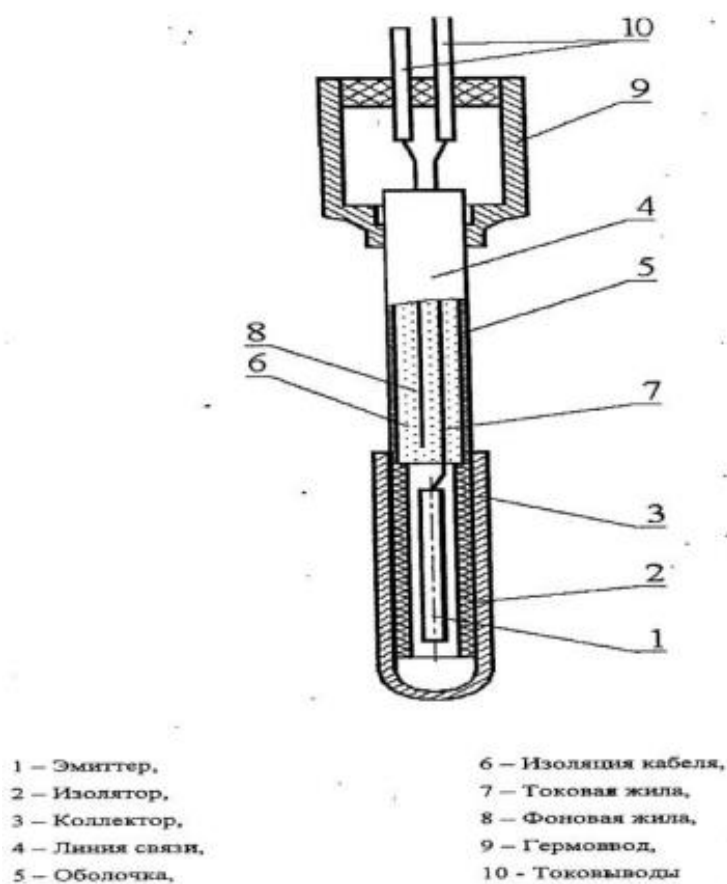
2) Формиране на сигнал за защита по линейна мощност на енергоотделяне:

а. Сигнал за „фалшиво“ сработване: $2.3E+07$;

б. Липса на сигнал за оценка: $2.7E+11$;

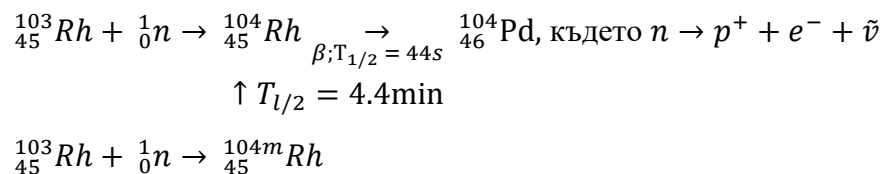
Токът за всеки един от детекторите в един комплект се коригира като извадим фоновия ток от него. Общия брой ДПЗ в активната зона на ВВЕР-1000 е 448, като всеки от тях е с дължина 25 [cm]. Възстановяването на енергоотделянето се постига чрез решаване на дифузионното уравнение и нормиране на неутронния поток в елементарни обеми чрез измерените стойности. Поради наличието на мигновена компонента е възможно да се следи за бързите флуктуации на неутронния поток и за вибрациите на касетите.

Всеки КНИ е разположен в централния канал на съответната горивна касета. Горивните касети с КНИ са групирани по симетрични орбити на енергоотделяне. Емитера в ДПЗ е ^{103}Rh . Един свеж КНИ съдържа около 4.26422 [g] родий с плътност 12.41 [g/cm³]. ДПЗ се състоят главно от емитер, изолатор, колектор, представени на Фигура 3-2 по-долу.



Фигура 3-2 Основна схема на ДПЗ (детектор пряк заряд).[13]

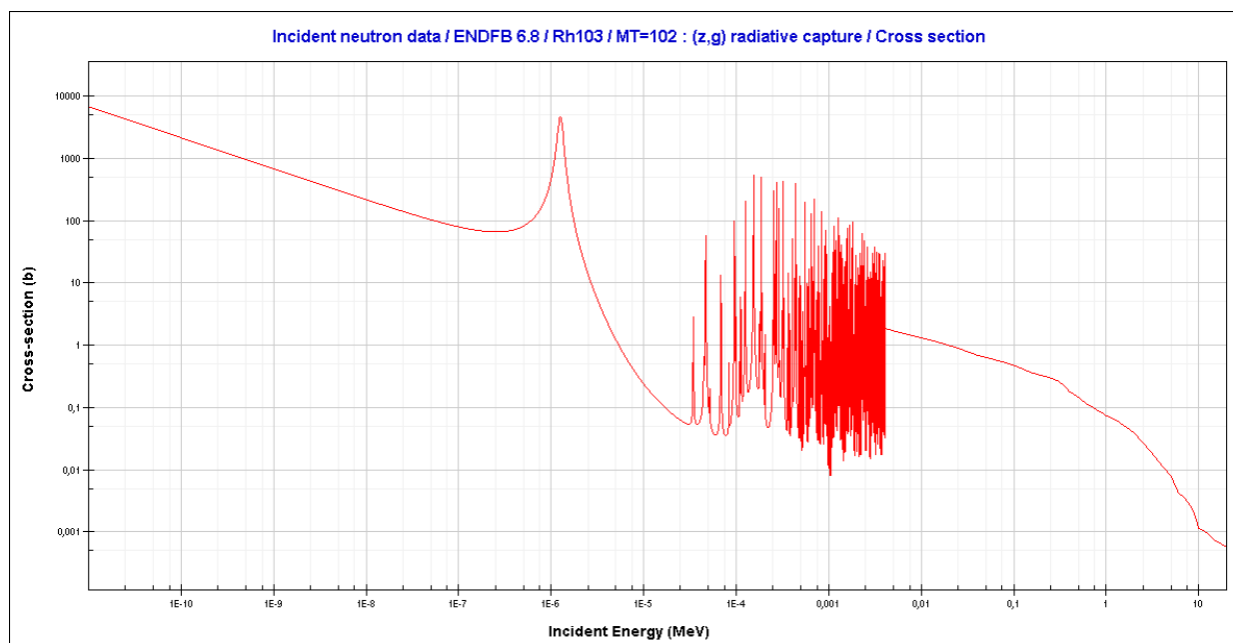
По време на експлоатация, в ДПЗ се осъществяват множество (n, γ) реакции на ^{103}Rh :



В ДПЗ се формира ток, 90% от който, в следствие на β-разпад на ^{104}Rh в стабилния ^{104}Pd с $T_{1/2}=44$ [s] и преход от метастабилно състояние на ^{104m}Rh в ^{104}Rh с $T_{1/2}=4.4$ [min]. Останалата част от тока (10%) е резултат от комптънов ефект и фотоефект в емитера на детектора. Един родиев детектор на практика се експлоатира не повече от 5

кампании в активната зона. След петата кампания, материалът ^{103}Rh е достатъчно изгорял от облъчване с неутрони и точността на измерванията му намалява.

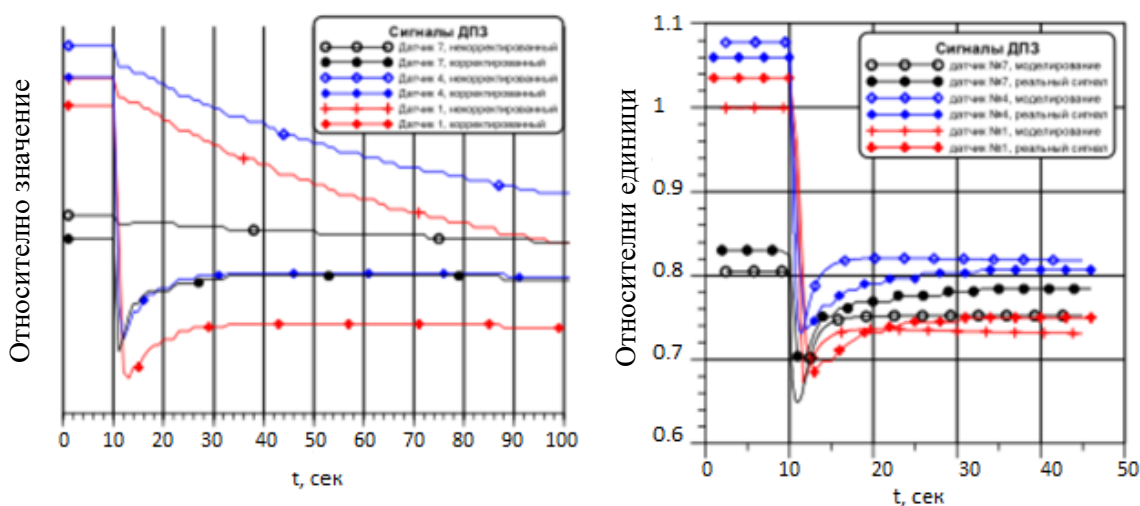
Експлоатирания ДПЗ спира да отговаря на изискванията и тогава бива сменен с нов.



Фигура 3-3 Микросечения на радиационно залавяне на ^{103}Rh . [14]

Зависимостта на микросеченията за неутронно залавяне на ^{103}Rh е функция на енергията. Има един широк резонанс при 1.3 [eV] и голям брой резонанси при по-високи енергии.

Сигналът получен от ДПЗ закъснява значително спрямо процесите, които протичат в активната зона. Този проблем е решен като се прилага софтуерна корекция. Реалния неутронен спектър в мястото на измерването зависи от множество фактори: плътност и температура на топлоносителя, обогатяване на ядреното гориво в горивната касета, дълбочина на изгаряне на горивната касета, борна концентрация в топлоносителя и др. Отчита се изгарянето на ^{103}Rh в ДПЗ и наличието му в горивните касети. ^{103}Rh е продукт на деленето в ядреното гориво и наличието води до взаимното му самоекраниране в горивото и в детектора.



Фигура 3-4 Пример на корекциите на неутронния поток след отстраняване на закъснението в сигнала.[12]

3.4 Възстановяване на параметрите на енергоотделяне на активната зона

Съгласно реф. 14, алгоритмите описващи възстановяване на параметрите на енергоотделяне на а.з. не са публично достъпна информация.

За целта на възстановяването, трябва да се интерпретира сигнала от родиевите детектори. Трябва да се отчете реалния неутронен спектър на мястото на измерването, а той основно зависи от следните фактори:

- Температура на топлоносителя;
- Плътност на топлоносителя;
- Концентрация на бор в топлоносителя;
- Начално обогатяване и дълбочина на изгаряне на горивото.

Отчита се изгарянето на Rh-103 в ДПЗ, а също и присъствието му в горивото. Нужно е да се добави връзката между детекторния сигнал от центъра на горивната касета и средната мощност по сечението на горивната касета. За интерпретиране на сигнала от ДПЗ са нужни и детайлни неутронно-физични пресмятания, като бъде използван възможно най-точен модел на реалната геометрия на горивната касета и на ДПЗ.

Грешките в модела и непълната информация за свойствата на активната зона се отразяват като неточност на дифузионните константи.

3.5 Параметри на енергоотделяне на системата

За интерпретацията на сигналите от ДПЗ се използват неутронно-физични пресмятания, които отчитат множество фактори.

С използването на нодални пресмятания биват възстановени следните коефициентите на неравномерност на енергоотделяне:

- 1) K_q – коефициент на неравномерност на енергоотделянето по касети
 - a. $K_q = K_{q \max} / K_{q \text{ average}}$
 - b. $K_{q \max}$ – най-натоварената касета в активната зона
 - 2) $K_{q \text{ average}}$ – средната мощност на касета в активната зона
 - 3) K_v - коефициент на неравномерност на мощността по обема на активната зона
 - a. $K_v = K_{v \max} / K_{v \text{ average}}$
 - b. $K_{v \max}$ – най-натоварения обем в активната зона
 - c. $K_{v \text{ average}}$ – средната мощност на един обем в активната зона
- Един обем е 1/10 от височината на горивната касета. За 163 горивни касети в активната зона има 1630 обема.
- 4) K_z - коефициент на неравномерност на енергоотделянето по височина на касетите
 - a. $K_z = K_v / K_{v \text{ average}}$
 - b. $K_{v \text{ average}}$ – средната мощност на един обем в активната зона
 - 5) K_o – коефициент на неравномерност на енергоотделянето по горивен елемент. Максимална мощност на енергоотделяне на горивен елемент към средна мощност на горивен елемент за зоната.
 - 6) BU – дълбочина на изгаряне на горивната касета в ефективни денонощия.

4. Общо описание на софтуерна платформа BEACON

BEACON™ (*Best Estimate Analysis of Core Operations – Nuclear*), е софтуерен пакет използван за вътрешно-реакторен контрол и мониторинг [17]. Създаден е от Уестингхаус за атомни централи от типа леко-воден реактор с вода под налягане. Системата BEACON позволява мониторинг на реактора в реално време като използва данни от детектори и термодвойки в реактора. Използва се също така модел (*нодален неутронно-физичен модел*), с който да позволи непрекъснат мониторинг на разпределението на мощността в активната зона. BEACON използва измервания от зоната в реално време за да предостави запас по линейна мощност на енергоотделяне, както и запас до криза на топлообмена, има опция за графично представяне на аномалии в активната зона, например спуснати контролиращи групи, аномалии във потока и ксенонови колебания. Оперативния персонал на съответната АЕЦ може да използва тази информация от системата BEACON за наблюдаване на разпределението на енергоотделяне в активната зона.

BEACON може да се използва за прогнозиране на състоянието на активната зона. За целта се използва тримерен нодален модел, който се обновява непрекъснато, използвайки информация от историята на състоянията на активната зона. BEACON позволява на потребителя достъп до непрекъснато обновявания нодален модел за да прави автоматизирани изчисления за състояния на критичност при пуск, запас по реактивност след спиране, изчисления за поддържане на минимална концентрация на бор след пускане на АЗ, изгаряне на горивния цикъл с опция за работа на мощностен ефект, и прогнозни изчисления за промяна в мощността на блока.

База данни с историята на състоянията на зоната се съхранява от системата BEACON. Историята може да се види от оперативния персонал с цел анализ на поведението на активната зона.

4.1 Общо описание на модулите на платформата. Операционни нива на системата BEACON.

Според Реф. [17], BEACON има три операционни нива. Нивата са със следните наименования:

- 1) On-Line Monitor (OLM);

- 2) Tech Spec Monitor (TSM);
- 3) Direct Margin Monitor (DMM).

Нивото BEACON-OLM (On-Line Monitor) е разработено за да изпълнява основните функционалности на BEACON. Те включват: непрекъснат мониторинг на активната зона, прогнозиране на активната зона и преглед на историята на състоянията. Това ниво се използва за получаване на информация и анализиране. Не се изисква действие от страна на оперативния персонал основаващо се на резултатите получени от мониторинг на активната зона. Това ниво на BEACON може да бъде използвано като инструмент за получаване на информация и анализиране на информацията, която да се използва от оперативния персонал. Използването на BEACON-OLM може да се въведе като вътрешна процедура на една АЕЦ. След това анализ на данни за разпределени на неутронния поток, условия на критичност в реактора, отчети за ядрен материал от BEACON и др., могат да заместят други офлайн програми и процедури, използвани за тези изчисления.

Нивото BEACON-TSM (Tech Spec Monitor) е разработено за да предостави на оператора възможност да въведе BEACON в технологичен регламент на блока за наблюдаване на параметри на енергоотделяне като K_0 , K_r , K_v и K_q . Това ниво включва всички основни функционалности на нивото BEACON-OLM. След като BEACON-TSM е въведен като процедура, са налични следните функционалности:

- Непрекъснато верифициране на съответствието с топлинните ограничения на активната зона от технологичния регламент;
- Разрешение от US NRC за увеличаване на времевия интервал между запис на картограми на неутронния поток до 180 ефективни денонощия;
Картограми на неутронния поток по данни от СВРК се използват за калибриране на BEACON и калибриране на външни детектори;
- Разрешение от US NRC за продължаване на експлоатация на блока с наличен *разсъгласуван* ОР без намаляване на мощността до 75%. Всички изисквания за измервания в активната зона са заместени в технологичен регламент на блока с функционалността на BEACON за мониторинг на зоната;

- Разрешение от USNRC за намаляване на измервателните уреди на СВРК до 50% от наличните, след пуск на реактора, и намаляване на термодвойките до 25% от наличните. Системата BEACON използва повърхнинни сплайн-функции за да компенсира данните от липсващите детектори и термодвойки съответно.

Нивото BEACON-DMM (Direct Margin Monitor) е разработено за да даде на оператора пълната функционалност на лиценза за BEACON от USNRC. Това ниво включва всички функционалности на BEACON-TSM и също така и директен мониторинг и опцията за ползване на запаса до криза на топлообмена като основна топлинна граница в технологичния регламент на блока. Нивото DMM на BEACON може непрекъснато да прави сравнения между параметри на енергоотделяне като Kr и Ko и запаса до техните предели в технологичния регламент на блока, както и за запас до криза на топлообмена (Tech Spec DNBR limit). Това позволява да се използва почти целия наличен запас по експлоатационни ограничения за определен горивен цикъл. Оператора има опцията да избере как и кога да използва този наличен по експлоатационни ограничения. Нивото DMM е нужно да бъде въведено в употреба в БЩУ за да може да се използва от оперативния персонал за наблюдение на активната зона и да бъде дефинирана свързаност с алармите за ограничения от Техн. Регламент на блока. BEACON-DMM предоставя следните функционалности:

- Разрешение от USNRC за непрекъснато верифициране на запас до криза на топлообмена;
- Прехвърляне в реално време между запаси по експлоатационни топлинни ограничения (например между максимална линейна мощност (Fq) и максимална мощност на енергоотделяне по TOE (FdH)), при наличен запас по DNBR;
- Одобрение от US NRC за премахване на експлоатационни ограничения по AFD (Axial Flux Difference – Разлика в аксиалните оценки на потока) или ASI (Axial Shape Index – аксиален офсет, определен от отношението на енергоотделянето в горната и долната части на активната зона). При постоянен мониторинг на запаса по DNBR ограниченията по AFD и/или ASI са излишни и не са необходими.

4.2 Основно описание на аналитичните модели, използвани за оценка на енергоотделянето на а.з.

Тримерния ANC-H (Advanced Nodal Code – Hexagonal) е програма разработена от Уестингхаус за нодални пресмятания на активната зона с шестоъгълни горивни касети. Заедно с програмата PHOENIX-H, която се използва като библиотека за макро и микро-сеченията, те съставят програмния пакет за генериране на физични разчети за реактори тип ВВЕР. [1]

4.2.1 Основна задача при прилагане на ANC-H и PHOENIX-H във ВВЕР

Според реф. 15, има две основни стъпки в съставянето на нодални пресмятания:

- 1) Първата основна стъпка е интегриране на напречния член на утечката на триизмерното дифузионно уравнение по три ортогонални направления за да бъде редуцирано до комплект от едномерни дифузионни уравнения;
- 2) Втората основна стъпка е въвеждането на приближения на профили на напречния неутронен ток;

Тези основни стъпки лесно биват прилагани за Декартова координатна система, но не и за шестоъгълна геометрия.

Един от методите, с които тези стъпки да се приложат към шестоъгълната геометрия на нодовете е да се използва конформност на изображенията.

4.2.2 Конформност на изображенията за уравнението на дифузия

Представените в раздела по-долу теоретични пояснения са взимствани от Реф. 15.

За яснота, пишем двумерното еднорупово дифузионно уравнение по следния начин:

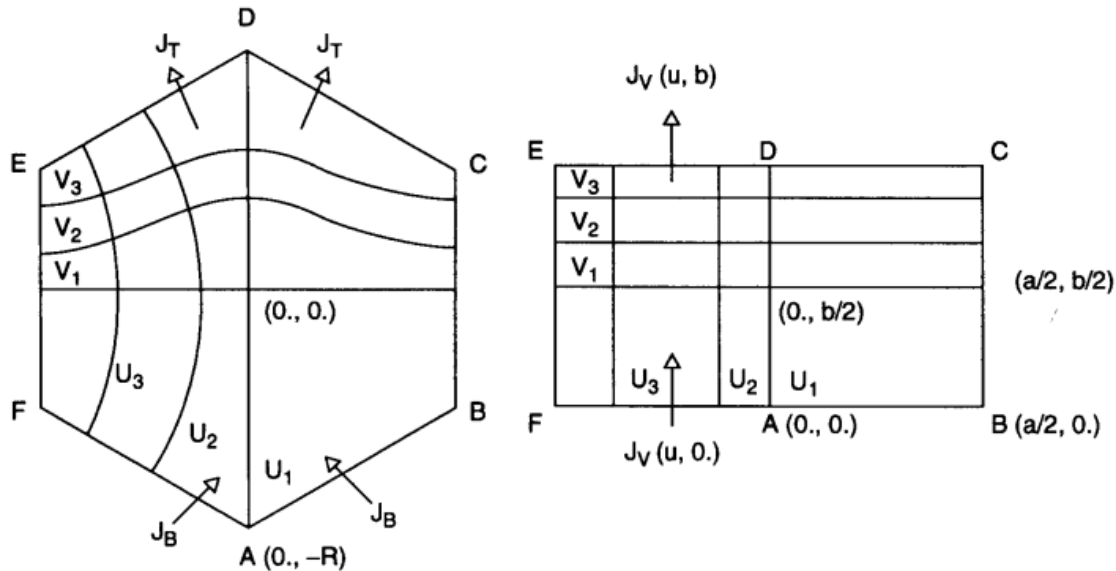
$$[-D(\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2) + \Sigma_a]\phi(x, y) = \frac{1}{\lambda}\Sigma_f\phi(x, y) \quad 2$$

където:

D – коефициент на дифузия;

Σ_a – макросечение за загуба на неутрони;
 Σ_f – макросечението за ядрено делене;
 $\phi(x, y)$ – плътност на скаларния неутронен поток.

Пояснения за метода и означенията са представени за хомогенен шестоъгълник Фигура 4-1 по-долу. Фигурата е взимствана от Реф. [15].



Комплексна равнина $Z (z = x + iy)$

Комплексна равнина $W (w = u + iv)$

Фигура 4-1 Конформно изображение на правоъгълник в шестоъгълник. [15]

Декартовите растери с константи u и v в правоъгълника са изображения на ортогоналните криволинейния растери в шестоъгълника. Кривите се пресичат със стените на шестоъгълника перпендикулярно. Оператора на дифузия в уравнение 2 е инвариант относно конформно изобразяване с точност до константа.

$$(\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2) = [1/g^2(u, v)](\partial^2 / \partial u^2 + \partial^2 / \partial v^2) \quad 3$$

Където:

$$g(u, v) = |dz/dw| \quad 4$$

Е не-отрицателната линейна функция на скалиране на изображението, а квадратът ѝ е скалиращата повърхнинна функция. Важно е да се отбележи, че промяна на константата на конформно изобразяване не зависи от посоката.

Вижда се, че уравнението на дифузия придобива следния вид:

$$[-D(\partial^2/\partial u^2 + \partial^2/\partial v^2) + \Sigma_a g^2(u, v)]\phi(u, v) = \frac{1}{\lambda} \Sigma_f g^2(u, v)\phi(u, v) \quad 5$$

Ако сравним уравненията 2 и 5 ще забележим, че хомогенния шестоъгълен нод е трансформиран в нехомогенен четириъгълен нод. Коефициента на нехомогенност, с който се умножават сеченията за делене и поглъщане, е зависеща само от геометрията функция за изобразяване g^2 . Конформното изображение между правоъгълник и шестоъгълник може да бъде получено със Шварц-Кристофелова трансформация.

След интегриране на напречния член на утечката по направлението v , получаваме следното едномерно дифузионно уравнение:

$$\begin{aligned} & -D(d^2\bar{\phi}/du^2) + \Sigma_a \bar{g}^2(u)\bar{\phi}(u) \\ & = \frac{1}{\lambda} \Sigma_f \bar{g}^2(u)\bar{\phi}(u) - \frac{1}{b} (J_T - J_B)g(u, 0) \end{aligned} \quad 6$$

Където $\bar{\phi}(u)$ и $\bar{g}^2(u)$ са осреднените стойности на $\phi(u, v)$ и $g^2(u, v)$. J_T и J_B са токовете на горната и долната повърхности на шестоъгълника съответно. Скаларния коефициент $g(u, 0)$ присъства защото тока се диференцира пространствено. Производните по z и по w се различават с точност до константа. Интегрирането на напречния член, на утечката на шестоъгълника, отговаря на клас от криви всяка от които е перпендикулярна на страните на шестоъгълника, както е показано на Фигура 4-1.

4.2.3 Нодални пресмятания с ANC-H

За която и да е група неутрони, уравнение 2 може да се запише по следния начин:

$$\begin{aligned} & -D \frac{d^2}{du^2} \bar{\phi}(u) + \Sigma_{a0} \bar{g}^2(u) \bar{\phi}(u) \\ & = \bar{g}^2(u) Q_u(u) - L_u(u) \end{aligned} \quad 7$$

Където:

$\Sigma_{\sigma 0}$ = сечение за излизане от групата осреднено по обем
 $L_w(u)$ = напречна утечка
 $Q_u(u)$ = източник на неутрони, включително и пространствените вариации, част от Σ_a
За дадени Q и L , решението на уравнение 7 може да бъде с приближение до следното развитие в ред:

$$\bar{\phi}(u) = A_u \cosh ku + B_u \sinh ku + \sum_{n=0}^2 a_n W_n(u) \quad 8$$

Където:

$$k = [\bar{g}^2(a/2)\Sigma_{a0}/D]^{1/2}$$

И W_n са полиноми ортогонални на $g^2(u)$ извън интервала $(-a/2, a/2)$.

Петте коефициента в уравнение 8 могат да бъдат намерени със следните пет условия: две гранични условия за $\bar{\phi}(u)$ по отношение на сумата от тоците на повърхностите $u = \pm a/2$; съвпадане на проекциите на първия момент (W_1) с втория момент (W_2) от двете страни на уравнение 7; и неутронния баланс в нода, което е същото като да съвпадне проекцията на нулевия момент (W_0) от двете страни на уравнение 7.

Проекцията се прави като се интегрират двете страни на ур. 7 в множителя $\bar{g}^2(u)W_n(u)$.

За съседни нодове с условие за непрекъснатост при стените за потоци и токове, следното тридиагонално матрично уравнение по u -посочни токове е установено за три съседни нода $n-1, n, n+1$:

$$\begin{aligned} & -(C_1^n - C_2^n)J_u^{n-1} + (C_1^n + C_2^n + C_1^{n+1} + C_2^{n+1})J_u^n \\ & - (C_1^{n+1} - C_2^{n+1})J_u^{n+1} \\ & = (Q_0^{n+1} - L_{0u}^{n+1})/\Sigma_a^{n+1} + C_4^{n+1}(Q_{1u}^{n+1} - L_{1u}^{n+1}) \\ & - C_3^{n+1}(Q_{2u}^{n+1} - L_{2u}^{n+1}) \\ & - (Q_0^n - L_{0u}^n)/\Sigma_a^n + C_4^n(Q_{1u}^n - L_{1u}^n) \\ & + C_3^n(Q_{2u}^n - L_{2u}^n) \end{aligned} \quad 9$$

където коефициентите C зависят от груповите константи.

Този процес се повтаря три пъти за всяка от трите страни, които обхващат по 120-градуса от шестоъгълника. За всяка от радиалните равнини има по три такива уравнения. Съществува и подобно уравнение за аксиалното направление. Уравнение 9 може да се реши за тока J_u .

Моментите на утечка в ур. 9 могат да се изразят като повърхностни токове в напречно направление. Ако ур. 9 се прилага в аксиално направление, $L_u(u)$ е парабола съставена от напречните утечки на трите съседни аксиални нода. Ако уравнение 9 се

прилага в радиално направление, $L_u(u)$ се състои от две части:

$$L_u(u) = L_u^Z(u) + L_u^R(u) \quad 10$$

Където $L_u^Z(u)$ е утечката поради аксиални токове и формата и също е парабола съставена от аксиални токове от три u -посочни съседни шестоъгълника. Радиалната компонента може да се види от дясната страна на уравнение 6 и е:

$$L_u^R(u) = \frac{1}{b} g(u, 0) [J_T(u) - J_B(u)], \quad 11$$

Където J_T и J_B са профили на токове на горните две повърхности и долните две повърхности на шестоъгълника, съответно както се вижда на Фигура 4-1. На всяка от шестте страни, профила на тока се счита за права, наклона на която се оценява от стойностите на потоците на съседни повърхности. Профилите $J_T(u)$ и $J_B(u)$ са изображенията на профилите на шестоъгълника върху правоъгълника.

Източника включва изгаряне върху сеченията. За групите от бързи и бавни неутрони те са съответно:

$$Q_u^{(1)}(u) = \left[\frac{1}{\lambda} \Sigma_f^{(1)}(u) - \Sigma_a^{(1)}(u) + \Sigma_{a0}^{(1)} \right] \bar{\phi}^{(1)}(u) + \frac{1}{\lambda} \Sigma_f^{(2)}(u) \bar{\phi}^{(2)}(u) \quad 12(a)$$

и

$$Q_u^{(2)}(u) = \Sigma_{12}(u) \bar{\phi}^{(1)}(u) - \left[\Sigma_a^{(2)}(u) - \Sigma_{a0}^{(2)} \right] \bar{\phi}^{(2)}(u) \quad 12(b)$$

Уравненията от 8 до 12(a) дават основното формулиране на нодалния метод използван в ANC-H.

Тъй като утечката е изразена с токове, уравнение 9 има само две неизвестни: източника Q и тока J . Свързвайки го с уравнения 8 и 12(a) те могат да бъдат намерени с конвенционален итеративен метод по вътрешни и външни итерации. Вътрешната итерация се прави с ур. 9 за да се намери решение за токовете, като е даден източника. С наличните токове, външната итерация се прилага за да се обнови потока, използвайки уравнение 8, след това и източника като се използва ур. 12(a).

4.2.4 Вътрешно-нодални представяния

За да се моделира ефекта на изгаряне, трябва да се представи пространствената промяна на сеченията в шестоъгълника. Счита се, че ефекта на изгаряне върху дифузионните коефициенти е пренебрежимо малък. Други сечения имат седем стойности за нод – стойностите от повърхностите на шестоъгълника и средна за нода стойност. При нодалните пресмятания, този ефект се отразява в уравнение 12, където считаме $\Sigma(u)$ за парабола съставена с цел да даде стойности за сигма на две повърхности от шестоъгълника, перпендикулярни на посоката u и за средното за нода Σ . За възстановяване на мощността по ТОЕ имаме нужда от двумерен профил, който дава стойностите на Σ за позицията на всеки ТОЕ. Това се получава като се направи напасване към шестте стойности на повърхностите и средната за нода стойности на сигма със следната двумерна функция:

$$\Sigma(r, \theta) = C_0 + \sum_{m=1}^3 C_{1m} \gamma_m + \sum_{m=1}^3 C_{2m} \gamma_m^2 + C_3 \sum_{m=1}^3 (-1)^m \gamma_m^3 \quad 13$$

Където:

$$\begin{aligned} \gamma_m &= r \cos(\theta - \alpha_m) \\ \alpha_m &= (m-1)(\pi/3) \end{aligned}$$

Базиса на сферичните функции (r, θ) е от центъра на шестоъгълника до центъра на повърхността. Има осем неизвестни коефициента в уравнение 13. Намират се чрез напасване на седемте стойности на Σ . Трите линейни коефициента C_{1m} , не са независими, защото са в равнина. Намира се решение за C_{1m} , което свързва C_{1m} със стойностите на Σ за повърхностите, което да е симетрично в m .

За изграждане на профила на потока вътрешен за нода с цел възстановяване на мощност по ТОЕ, се прави приближение за разпределението на потока развиване по вълнови функции. Приближението трябва да се напасне по шестте стойности на потока на повърхностите и шестте стойности на потока в ъглите. В ANC-Н потока в ъгъла се

изчислява като се интерполират осреднените по обем потоци на трите нода около ъгъла и осреднените по повърхности потоци на трите правоъгълника пресичащи се в ъгъла.

Двугруповото дифузионно уравнение за хомогенен нод може да бъде диаголизирано до следното:

$$\begin{bmatrix} \nabla^2 + \mu^2 & 0 \\ 0 & \nabla^2 - \nu^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_\mu \\ \phi_\nu \end{bmatrix} = 0 \quad 14$$

Където μ^2 и $-\nu^2$ са двете собствени стойности в следствие от диагонализирането, ϕ_μ и ϕ_ν са двата собствени вектора, които са линейни комбинации на потоците от бързи и топлинни неутрони. Двете дифузионни уравнения в ур. 14 са хармоници и хомогенни, и техните решения са линейни комбинации от вълни във всички посоки. За двумерния случай:

$$\phi_\mu(r, \theta) = \int_0^{2\pi} A_\mu(\alpha) \sinh [\mu r \cos (\theta - \alpha)] d\alpha \quad 15$$

$$\phi_\nu(r, \theta) = \int_0^{2\pi} A_\nu(\alpha) \sinh [\nu r \cos (\theta - \alpha)] d\alpha \quad 16$$

Където $A(\alpha)$ е коефициент зависещ от посоката. Граничните стойности за ϕ са шестте осреднени по повърхност потока и шестте ъглови потока. Правим приближение за профила на потока като линейна комбинация на дванадесет члена и избираме дванадесет дискретни посоки на α . Дванадесетте коефициента от развитието, биват определени след като приближението бъде напаснато по шестте стойности за тока на повърхностите и шестте стойности на тока на ъглите.

4.3 Използвани входни данни в платформата

4.3.1 Мониторинг на активната зона с помощта на КНИ

Метода за мониторинг на зоната с BEACON е лицензиран въз основата на подвижна система за моделиране на неутронния поток с периодично калибриране. Коефициенти за калибриране на всеки нод биват създадени, когато модела бива калибриран с вътрешни за а.з. детектори и се пресмята със следното уравнение:

$$MCF(x, y, z) = \overline{\left(\frac{MRR}{PRR} (i, j, k) \right)}$$

Където:

$MCF(x, y, z)$ – Коефициенти на калибриране по нод;

MRR, PRR – Измерени и прогнозирани стойности на скоростите на реакция в позиция (i, j, k) ;

----- – Повърхнинни сплайни за корекция на скоростите на реакция за всяка аксиална позиция на нода.

Едновременно с това, термодвойките на изхода на активната зона също биват калибрирани относно завишаването на енталпията. Използват се данни от термодвойките на изхода на зоната и външно корпусни детектори за поддържане на непрекъснатия мониторинг между калибриранията на системата. Референция 17 предлага по-детайлно обяснение на методологията на мониторинг на зоната с BEACON.

Използването на стационарни КНИ за мониторинг на зоната в системата BEACON се основава на същия метод споменат горе, отнасящ се за подвижните детектори и термодвойки. Системата със стационарни КНИ се използва за периодично калибриране на BEACON. След калибриране, данните от КНИ биват използвани за поддържане на непрекъснатия мониторинг на зоната вместо термодвойките и подвижните външно корпусни детектори. Системата със стационарни КНИ предоставя информация с висока точност за радиалното и аксиалното разпределение на мощността в зоната. Измереното по нодове разпределение на мощността можем да получим със следното уравнение:

$$P_m(x, y, z) = P_p(x, y, z) \overline{\left(\frac{I_m}{I_p} (i, j, k) \right)}$$

Където:

$P_p(x, y, z)$ – Прогнозирано разпределение на мощността по нодове

$I_m, I_p(i, j, k)$ – Измерени и прогнозирани токове от детектори на местоположения

----- – Повърхнинни сплайни за корекция на скоростите на реакция за всяка аксиална позиция на нода.

BEACON се използва за прогнозиране на токовете от ДПЗ като използва тримерен нодален модел на разпределението на мощността. Уравнението, което BEACON използва за пресмятане на тока от родиев детектор е следното:

$$I_p = C(\beta_1 \sigma_{a1} \phi_1 + \beta_2 \sigma_{a2} \phi_2) N_{rh}$$

Където:

N_{rh} – концентрация на родий

σ_{a1}, σ_{a2} – функции на сечения на родия

β_1, β_2 – функция за загуба на електрони $f(N_{rh})$

ϕ_1, ϕ_2 – потоци от бързи и топлинни неутрони в детектора

C – коефициент за преобразуване в електричен ток

Микросеченията биват получени от кода PHOENIX разработен от Уестингхаус. Потоците от бързи и топлинни неутрони в детектора биват получени от метода за възстановяване на енергоотделянето по ТОЕ в BEACON.

4.3.2 Изгаряне на В-10

Почти всички оператори, които в момента имат системата BEACON, експлоатират зона на мощност достатъчно дълго за да се наблюдава изгаряне на В-10 в топлоносител. Това има ефект върху пресмятането на разликата между предвидената борна концентрация и измерената такава, също и върху прогнозирането на критични параметри за зоната и други прогнози за промяна в мощността на блока. След обратна връзка с клиенти, към функционалността на BEACON са добавени пресмятания за изгаряне на В-10 в реално време. За пресмятанията се използва интегрираният неутронен поток и натрупаните потоци на системата за подпитка, както е показано в следните уравнения:

$$\begin{aligned}\frac{dB^{10}}{dt} &= \int \left[-(\sigma_{a1}\phi_1 + \sigma_{a2}\phi_2) * B^{10} * \frac{V_{cor}}{V_{rcc}} \right] dV + \frac{FR_B}{V_{rcc} * \rho} * BC_{bat} * R_{bat} - \frac{FR_M}{V_{rcc} * \rho} * B^{10} \\ \frac{dB^{11}}{dt} &= \left[\frac{FR_B}{V_{rcc} * \rho} * BC_{bat} * (1 - R_{bat}) \right] - \frac{FR_M}{V_{rcc} * \rho} * B^{11}\end{aligned} \quad 17$$

Където:

B^{10}, B^{11} – концентрация на В-10 и В-11

ϕ_1, ϕ_2 – поток от бързи и топлинни неутрони

σ_{a1}, σ_{a2} – сечения за поглъщане на бързи и топлинни неутрони от В-10

V_{cor}, V_{rcc} – обем на топлоносителя в реактора и обем на топлоносителя в първи контур

FR_B, FR_M – Разходи за бориране и подпитка

BC_{bat} – концентрация на бор в резервоара с борна киселина

R_{bat} – Атомно отношение на В-10 в бака за съхранение н борна киселина.

ρ – средна плътност на водата

BEACON пресмята разходите на подпитка и бориран топлоносител, добавени към първи контур, чрез данните от системите на блока. Персонала може също така да дефинира отношението на В-10 в системата, на базата на измерени стойности от топлоносителя в блока.

5. Описание на методиката за извършване на сравнението

Сравнението е извършено с приложения, създадени конкретно за сравняване на параметрите на енергоотделяне K_r , K_q , K_v , K_o и изгарянето (BU).

Приложенията стартират в команден прозорец в Linux и има следните функционалности:

1. Въвеждане на име на наличен изходен файл от BEACON. Въведеното трябва да е системен файл от BEACON, който е картограма на а.з. със съответния параметър на енергоотделяне и стойността за съответната горивна касета;
2. Въвеждане на име на наличен изходен файл от СВРК-М. Въведеното трябва да е системен файл от СВРК-М, който е картограма на а.з. със съответния параметър на енергоотделяне и стойността за съответната горивна касета;
3. Въвеждане на един параметър за сравняване - K_r , K_q , K_v , K_o или изгаряне (BU);
4. След успешно въвеждане на данните входни за програмата за сравнение, се генерира изходен файл съдържащ картограма със относителните разлики на сравнения параметър в проценти (Фигура 5-1). Също и информация като стандартно отклонение на популацията, минимално и максимално отклонение за сравнения параметър.

Данните от изходните файлове за всички сравнения са включени в Приложение 1, като са изобразени в картограми направени в XcellTM. Клетките на стойностите в картограмата са оцветени с опцията „условно форматиране“ за по-добра прегледност.

Относителните разлики в проценти за изгаряне са пресметнати по следния начин:

$$x_i^{BU} = \frac{100 * (\text{Изгаряне}_i^{\text{СВРК-М}} - \text{Изгаряне}_i^{\text{BEACON}})}{\text{Изгаряне}_i^{\text{СВРК-М}}}$$

Където:

Изгаряне_{*i*}^{СВРК-М} – Стойност на изгаряне на касета с номер *i* изчислена от СВРК-М;

Изгаряне_{*i*}^{BEACON} – Стойност на изгаряне на касета с номер *i* изчислена от BEACON.

Параметрите на енергоотделяне са нормирани по мощност. Следва относителните разлики в проценти за параметрите K_r, K_q и K_v да са пресметнати по следния начин:

$$x_i^{Param} = 100 * (\text{Параметър}_i^{\text{СВРК-М}} - \text{Параметър}_i^{\text{BEACON}})$$

Където:

Параметър_{*i*}^{СВРК-М} – Стойност на съответния параметър на енергоотделяне с номер *i* изчислен от СВРК-М;

Параметър_{*i*}^{BEACON} – Стойност на съответния параметър на енергоотделяне с номер *i* изчислен от BEACON.

6. Резултати от сравнението и анализ на резултатите

6.1 Резултати от сравнението

Сравнението, между BEACON-TSM 6.9.1 и СВРК-М, на параметрите на енергоотделяне, изгаряне и стандартно отклонение е направено за 3 състояния: 270, 300 и 330 ефективни денонощия. Стойностите от тези сравнения са представени в Таблица 6-1 и Таблица 6-2 по-долу.

Таблица 6-1. Стойности на максимално и минимално отклонение, абсолютно максимално отклонение и стандартно отклонение за сравнените параметри на енергоотделяне.

Отклонения на експл. данни от BEACON	270 еф. д.	300 еф. д.	330 еф. д.
К_q (спрямо СВРК-М)			
Макс. откл. [%]	2.6	2.9	2.6
Мин. откл. [%]	-3.1	-2.9	-2.6
Абс. макс. откл. [%]	3.1	2.9	2.6
Стандартно отклонение	2.103	1.271	1.166
К_r (спрямо СВРК-М)			
Макс. откл., %	2.8	3.3	2.9
Мин. откл., %	-8.3	-7.9	-7.7
Абс. макс. откл., %	8.3	7.9	7.7
Стандартно отклонение	2.863	2.887	2.866
KV, 1 сл. (спрямо СВРК-М)			
Макс. откл., %	0.9	0.1	1.7
Мин. откл., %	-5.0	-7.1	-5.6
Абс. макс. откл., %	5.0	7.1	5.6
Стандартно отклонение	1.592	1.568	1.409
KV, 2 сл. (спрямо СВРК-М)			
Мин. откл., %	0.3	0.6	1.1
Макс. откл., %	-5.9	-5.9	-4.5
Абс. макс. откл., %	5.9	5.9	4.5
Стандартно отклонение	1.632	1.631	1.331
KV, 3 сл. (спрямо СВРК-М)			
Макс. откл., %	0.5	0.9	1.6
Мин. откл., %	-5.5	-5.4	-4.2
Абс. макс. откл., %	5.5	5.4	4.2
Стандартно отклонение	1.567	1.574	1.410
KV, 4 сл. (спрямо СВРК-М)			
Макс. откл., %	0.9	1.2	1.9
Мин. откл., %	-5.0	-4.9	-3.7
Абс. макс. откл., %	5.0	4.9	3.7

Отклонения на експл. данни от BEACON			
	270 еф. д.	300 еф. д.	330 еф. д.
Стандартно отклонение	1.408	1.404	1.336
KV, 5 сл. (спрямо СВРК-М)			
Макс. откл., %	1.6	1.5	2.8
Мин. откл., %	-4.1	-3.9	-3.5
Абс. макс. откл., %	4.1	3.9	3.5
Стандартно отклонение	1.223	1.213	1.278
KV, 6 сл. (спрямо СВРК-М)			
Макс. откл., %	2.3	2.4	3.3
Мин. откл., %	-3.0	-3.1	-2.6
Абс. макс. откл., %	3.0	3.1	3.3
Стандартно отклонение	1.274	1.241	1.271
KV, 7 сл. (спрямо СВРК-М)			
Макс. откл., %	12.1	11.0	13.4
Мин. откл., %	-0.8	-0.9	0.5
Абс. макс. откл., %	12.1	11.0	13.4
Стандартно отклонение	3.114	2.991	3.182

Таблица 6-2. Стойности на максимално и минимално отклонение, абсолютно максимално отклонение и стандартно отклонение за сравненото изгаряне.

Отклонения на експл. данни от BEACON			
	270 еф. д.	300 еф. д.	330 еф. д.
Изгаряне (спрямо СВРК-М)			
Макс. откл. [%]	0.695	0.736	0.770
Мин. откл. [%]	-6.724	-6.084	-5.638
Абс. макс. откл. [%]	6.724	6.084	5.638
Стандартно отклонение	2.103	1.902	1.733

6.2 Анализ на резултатите от сравненията

Резултатите от сравненията са съпоставени с критериите за приемливост на резултатите, дефинирани в Референция 18. Съответните критерии *не са представени* в настоящия труд от съображения за конфиденциалност на данни на АЕЦ Козлодуй.

За всяко от разглежданите 3 състояния на реактора, експлоатационните данни от BEACON за относително енергоотделяне по касети, K_q , **не се отличават спрямо аналогичните данни от СВРК-М, с повече от 3.1%**

Експлоатационните данни, определящи максималните отклонения на BEACON **са по-консервативни** (абсолютните максимални отклонения са определени от **отрицателни** стойности на минималните отклонения) **спрямо аналогичните данни от СВРК-М**. В случая „по-консервативни“ са данните по-високи по абсолютна стойност.

Наблюдават се сравнително големи отклонения на оценените от BEACON стойности за $FdH(K_r)$, тези отклонения се наблюдават единствено в касети от периферията на активната зона. [Приложение 1]

Сравненията на експлоатационни данни за коефициента на неравномерност на енергоотделянето по обеми на активната зона (на ниво касета, по 7 слоя), K_v , показват, че с изключение на слой 7, за всички състояния, данните от BEACON **не се отличават спрямо аналогичните данни от СВРК-М, с повече от 7.1%**

Освен това, с изключения слой 7, за всички състояния, за всяко от разглежданите сравнения, данните от BEACON **са по-консервативни** (абсолютните максимални отклонения са определени от **отрицателни** стойности на минималните отклонения), **спрямо аналогичните данни от СВРК-М**.

В следствие, е установено, че основна причина за наблюдаваните систематични отклонения в слой 7 на обемното енергоотделяне по касети, е неточност в дефиницията на входните данни, свързани с аксиалното разположение на ДПЗ в активната зона.

7. Заключение

Данните от СВРК-М и BEACON са сравнени с помощта на приложения, разработени от Уестингхаус, за целите на проекта за внедряване на BEACON в бл. 5 на АЕЦ Козлодуй.

Приложенията са модифицирани допълнително за целите на настоящият труд, за се ограничи представената информация, единствено до относителни разлики между разглежданите параметри, с цел да се избегне разпространение на конфиденциална информация на АЕЦ Козлодуй.

Софтуерната платформа BEACON е успешно валидирана чрез сравнение с данни от СВРК-М. Процедурата по валидация е в съответствие със специфичните изисквания и критерии на АЕЦ Козлодуй, за сравнение на експлоатационни данни от СВРК с резултатите от разчетните параметри на енергоотделяне в активната зона, представени в референция [18].

Обобщените резултати на относителните разлики от сравненията на данни между BEACON и СВРК са в таблици 1 и 2. Всички картограми от сравненията са включени в Приложение 1.

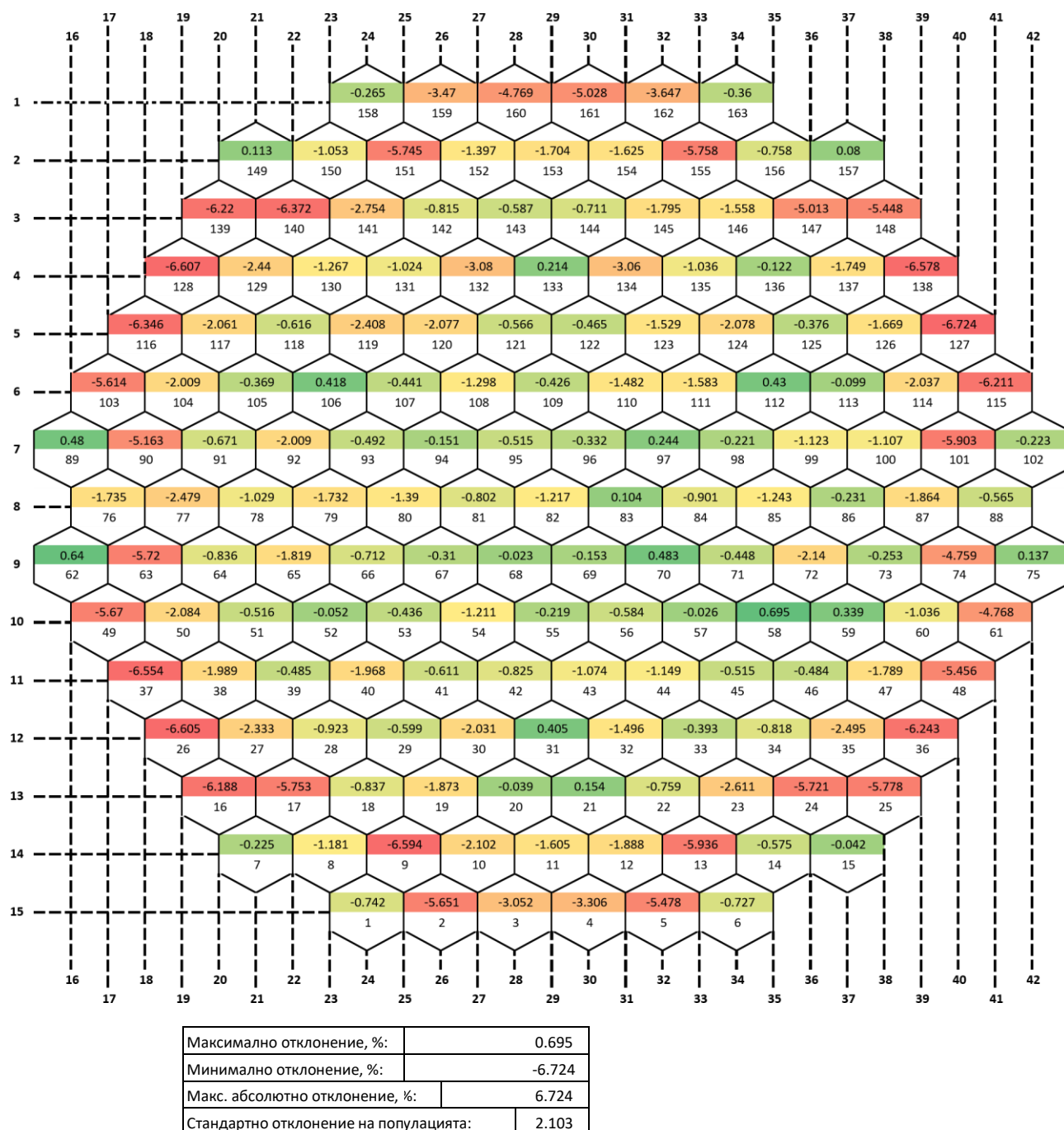
Всички цели и задачи на дипломната работа са изпълнени успешно.

8. Списък с използваната литература

1. ТЕХНИЧЕСКО ЗАДАНИЕ: № 22.ЕП-2. ТЗ.1155 Замяна на програмно-технически комплекс горно ниво (ПТК-ВУ) на системата за вътрешнореакторен контрол (СВРК) на 5 ЕБ и доставка на комплекса програми АРА-Н (ALPHA-Н, PHOENIX-Н, ANC-Н).
2. SSG-39 Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants
3. IEC 61225:2019 Nuclear power plants - instrumentation, control and electrical power systems - Requirements for static uninterruptible DC and AC power supply systems;
4. IEC 6 1226:2020 Nuclear power plants - Instrumentation, control and electrical power systems important to safety - Categorization of functions and classification of systems (IEC 61226:2020);
5. БДС EN IEC 62138:2020 Ядрени централи. Апаратура и управление на системи , важни за безопасността. Аспекти на софтуера за компютърни базови системи характеризиращи изпълнението на функциите за категория В или С (IEC 62138:2018);
6. IEEE Std 730-2014 IEEE Standard for Software Quality Assurance Processes;
7. IEEE Std 830- 1998 Recommended Practice for Software Requirements Specifications;
8. IEEE Std 1012™-2016, IEEE Standard for System Software, and Hardware Verification and Validation;
9. IEEE Std 1016™-2009 IEEE Standard for Information Technology-Systems Design Software Design Descriptions ;
10. ISO/IEEE 12207 - Systems and software engineering- Software life cycle processes;
11. Е. Вапирев, И. Христосков, „Неутронно-физични процеси при ВВЕР-440 (В-230) и ВВЕР-1000 (В-320)“, Физически факултет, СУ, 2003 год.
12. П. Петков, „Експлоатационна реакторна физика и ядрена безопасност-2 — Лекция 3: Детектори за контрол на неутронния поток в активната зона и извън нея: импулсни и токови детектори. Възстановяване на неутронното поле по радиус и височина на активната зона. Вътрешнореакторен контрол при ВВЕР“, София, 2024 год.

13. К. Каменов, Дипломна работа, „Анализ на влиянието на изгарянето на родия върху показанията на неутронните детектори от СВРК“, София, 2009 год.
14. Петко Петков, „Експлоатационна реакторна физика и ядрена безопасност- I част“, София, 2009 год.
15. Chao, Y. A., & Shatilla, Y. A. (1995). „Conformal Mapping and Hexagonal Nodal Methods —II: Implementation in the ANC-H Code,“ *Nuclear Science and Engineering*, 121(2), 210–225. <https://doi.org/10.13182/NSE95-A28559>
16. Georgieva, Emiliya. (2016). „Development of a Cross-Section Methodology and a Real-Time Core Model for VVER-1000 Simulator Application.“ 10.5445/IR/1000059594.
17. William A. Boyd and R. Wade Miller. THE BEACON ON-LINE CORE MONITORING SYSTEM: FUNCTIONAL UPGRADES AND APPLICATIONS. *Westinghouse Electric Corporation, Commercial Nuclear Fuel Division, Pittsburgh, Pennsylvania USA*
18. WNA-PV-00138-KOZ5, Редакция 1, „Процедура за валидация на софтуерна платформа BEACON“, Уестингхаус Електрик Швеция АБ, клон България.

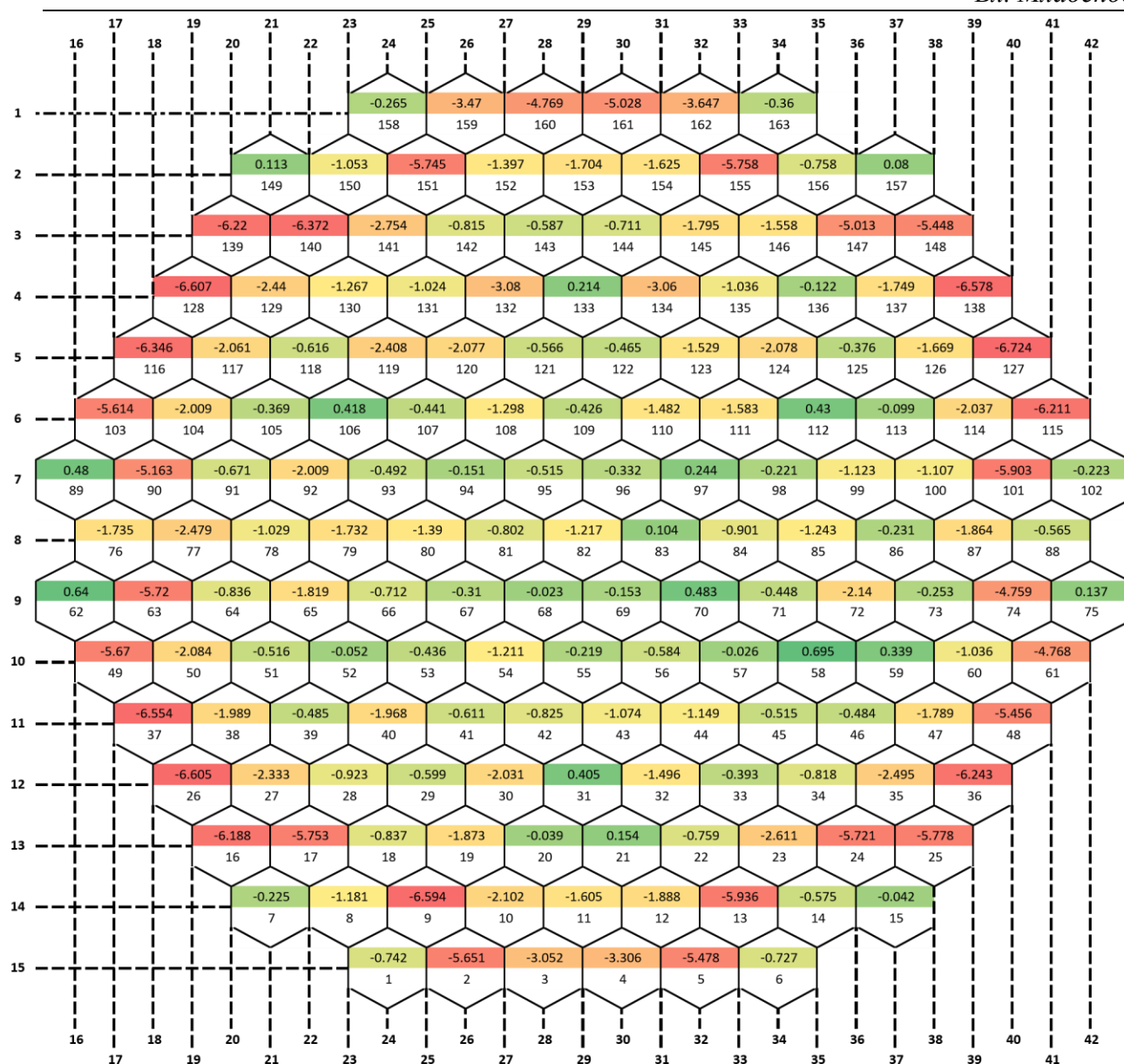
9. Приложение 1



Фигура 9-1. Сравнение на дълбочина на изгаряне (BU) по касети при 270 ефективни денонощия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

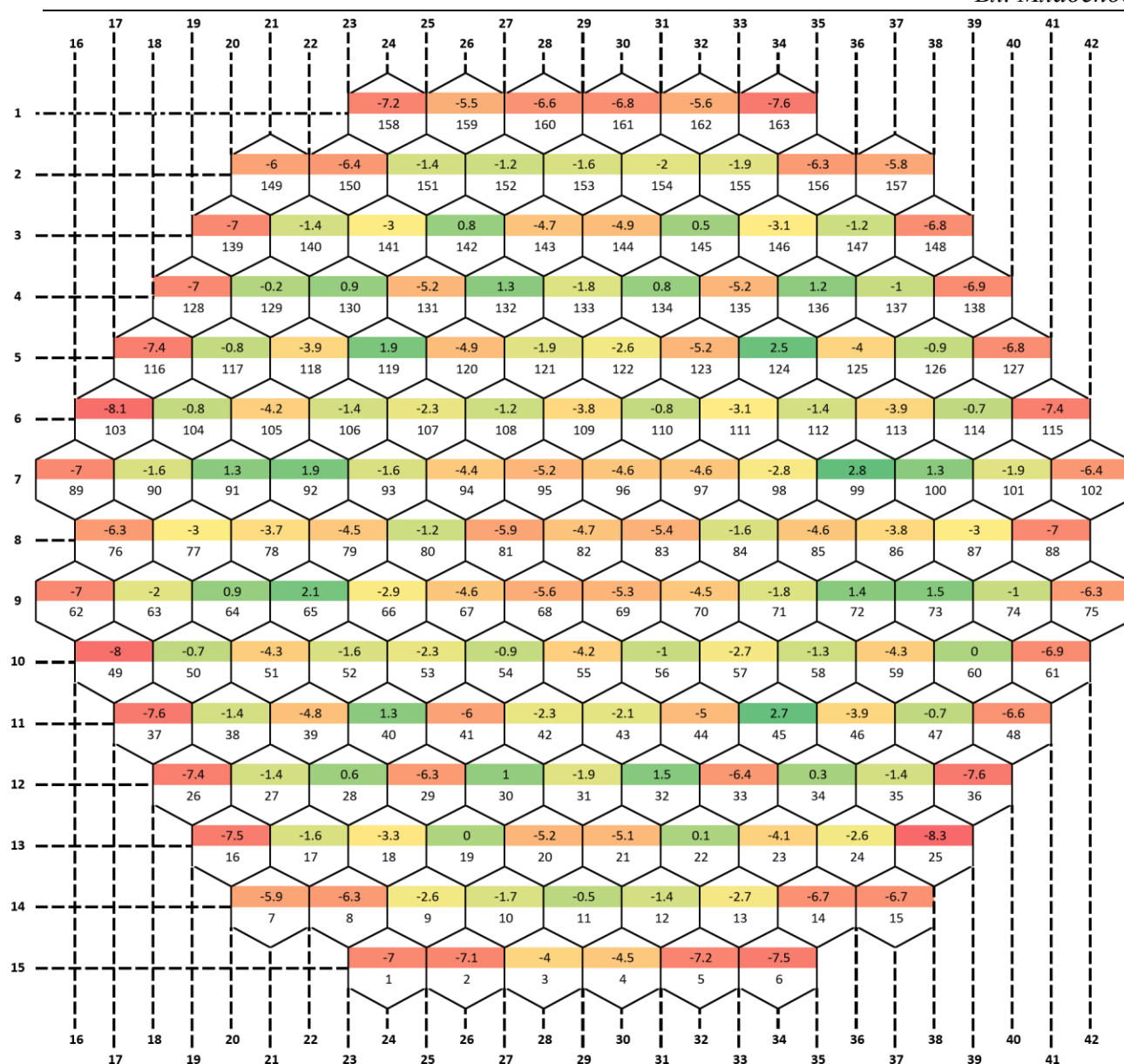


Максимално отклонение, %:	0.695
Минимално отклонение, %:	-6.724
Макс. абсолютно отклонение, %:	6.724
Стандартно отклонение на популацията:	2.103

Фигура 9-2. Сравнение на K_q по касети при 270 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

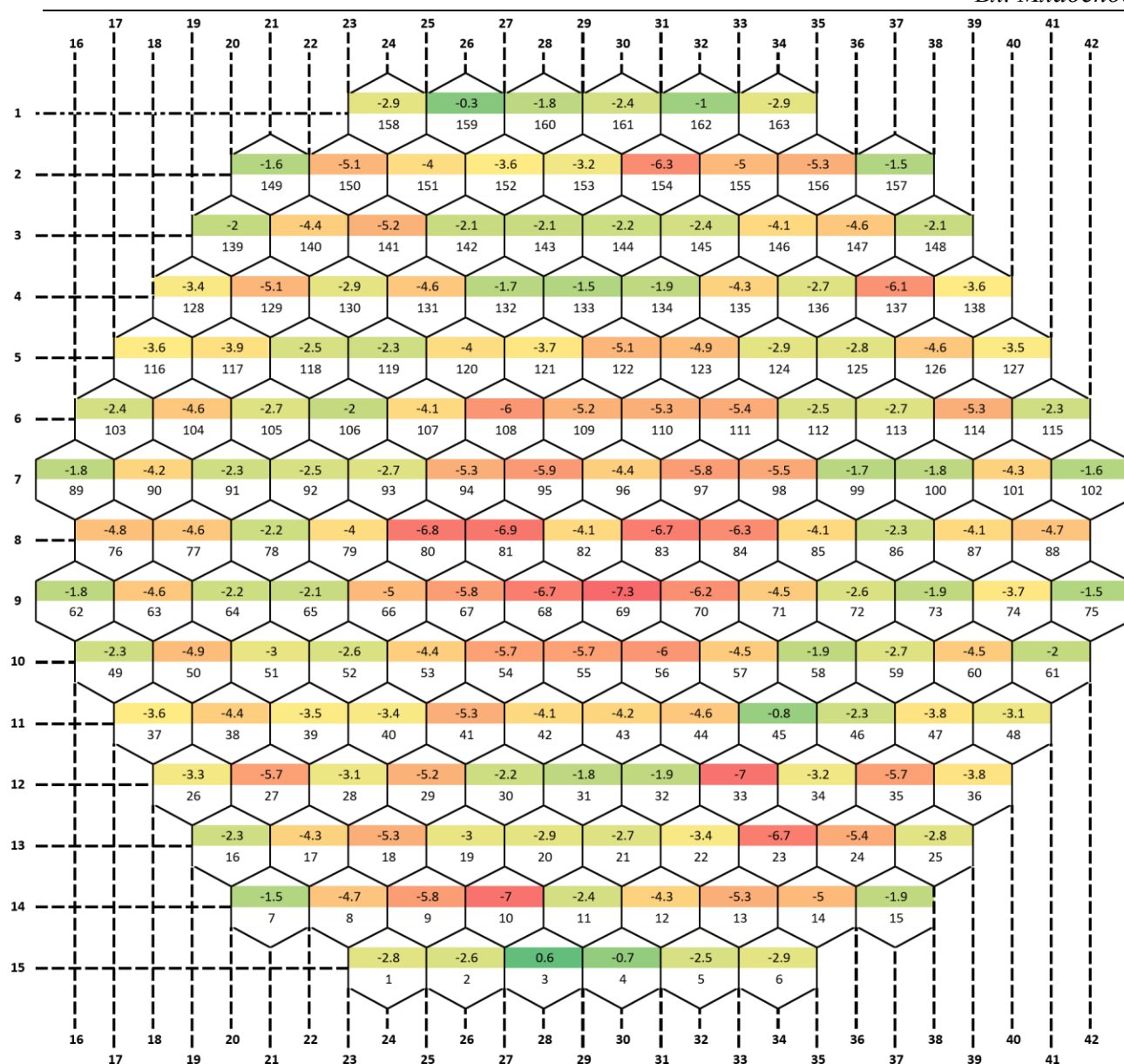


Максимално отклонение, %:	2.8
Минимално отклонение, %:	-8.3
Макс. абсолютно отклонение, %:	8.3
Стандартно отклонение на популацията:	2.863

Фигура 9-3. Сравнение на K_r по касети при 270 ефективни денонощия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

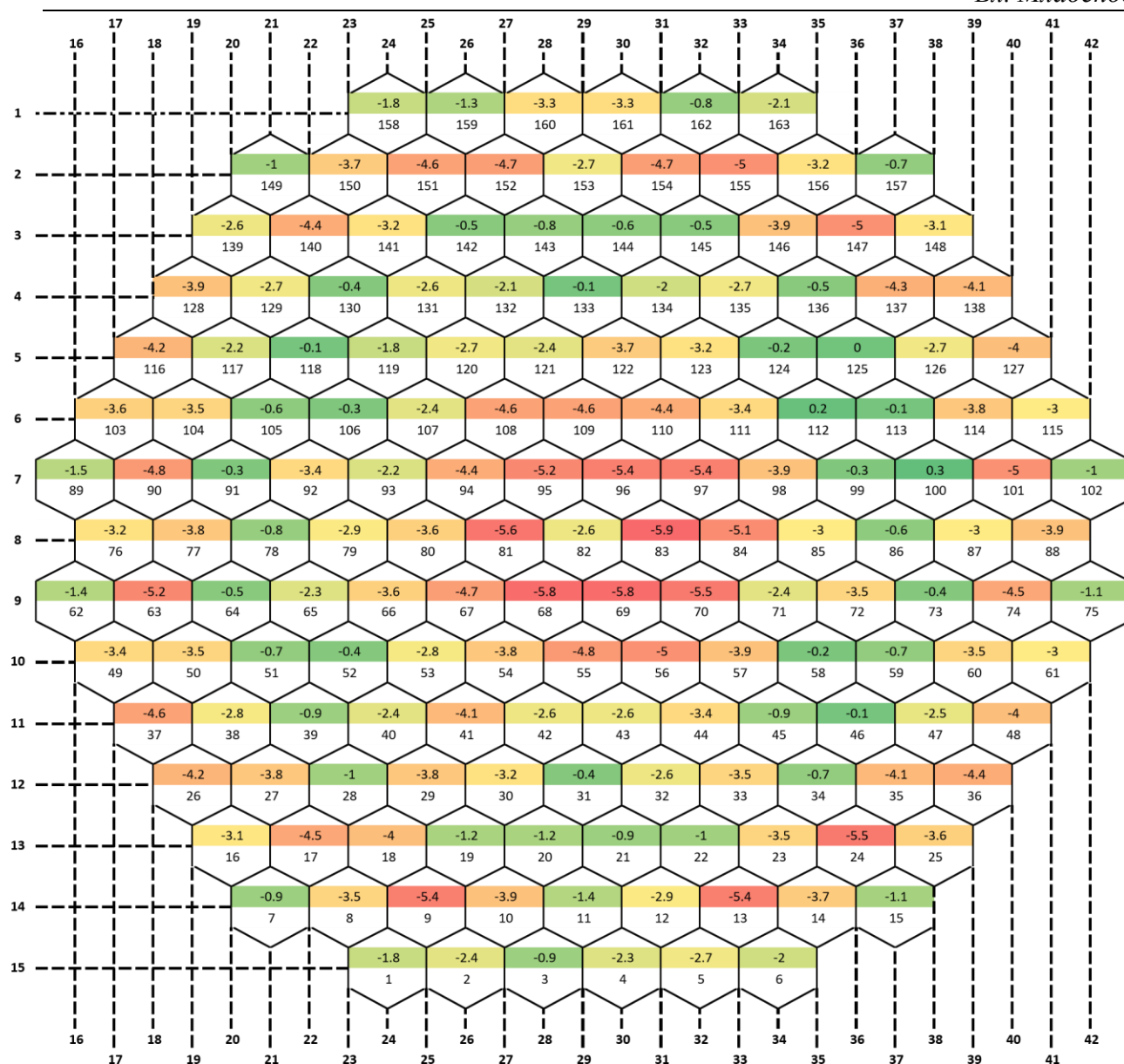


Максимално отклонение, %:	0.6
Минимално отклонение, %:	-7.3
Макс. абсолютно отклонение, %:	7.3
Стандартно отклонение на популацията:	1.592

Фигура 9-4. Сравнение на K_V по касети, слой 1, при 270 ефективни денонощия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

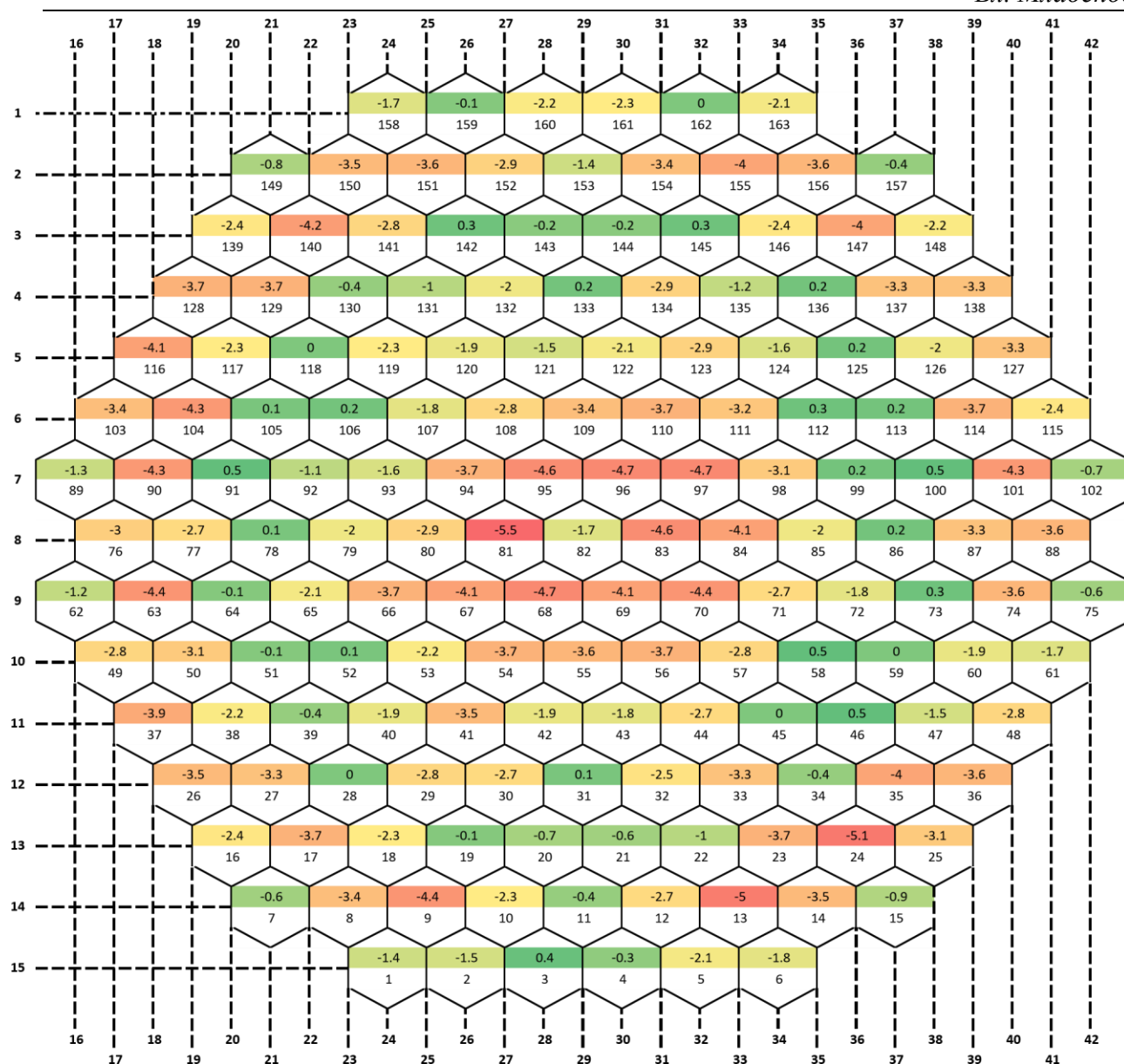


Максимално отклонение, %:	0.3
Минимално отклонение, %:	-5.9
Макс. абсолютно отклонение, %:	5.9
Стандартно отклонение на популацията:	1.632

Фигура 9-5. Сравнение на K_V по касети, слой 2, при 270 ефективни деңоноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

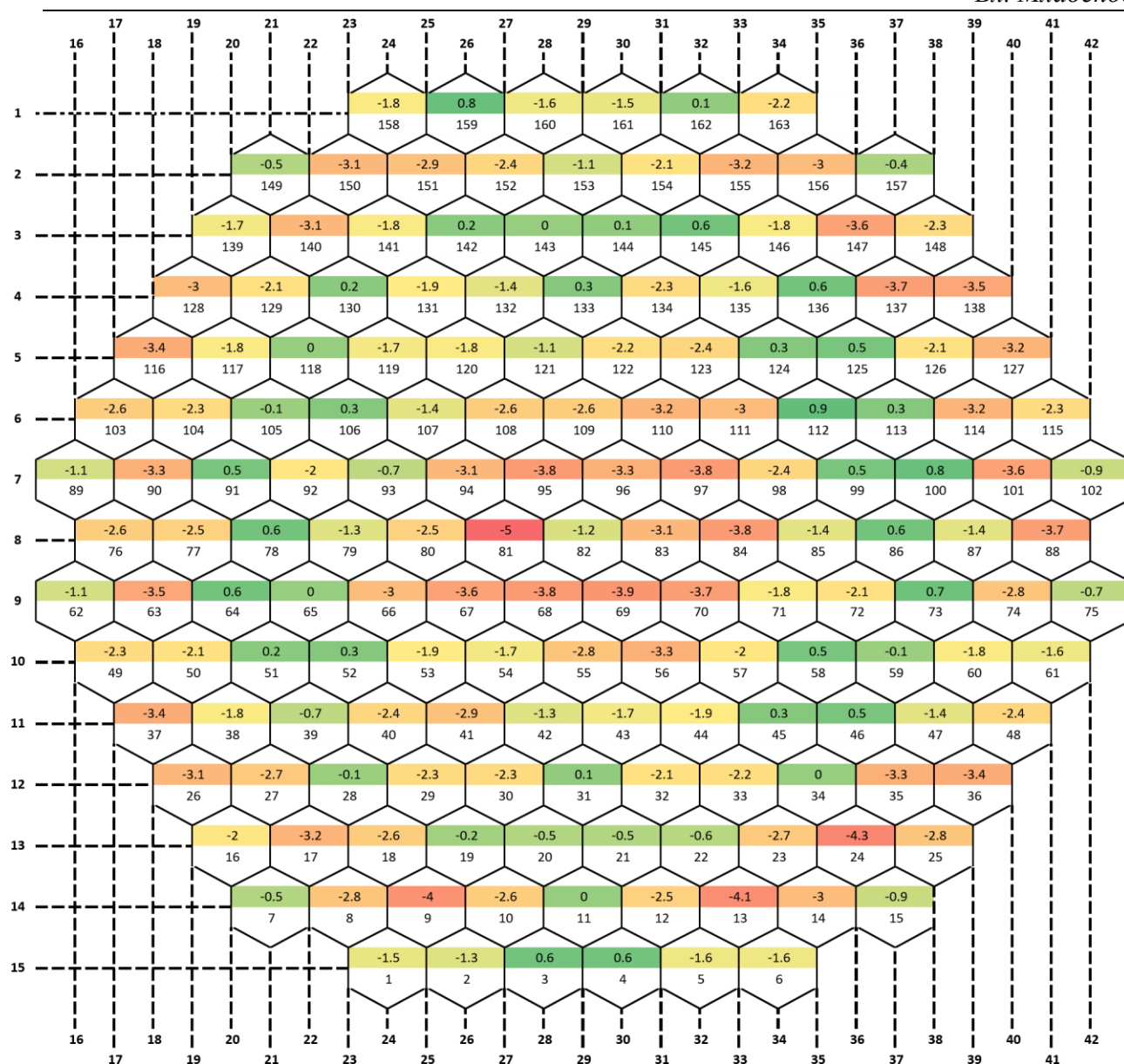


Максимално отклонение, %:	0.5
Минимално отклонение, %:	-5.5
Макс. абсолютно отклонение, %:	5.5
Стандартно отклонение на популацията:	1.567

Фигура 9-6. Сравнение на K_V по касети, слой 3, при 270 ефективни денонощия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

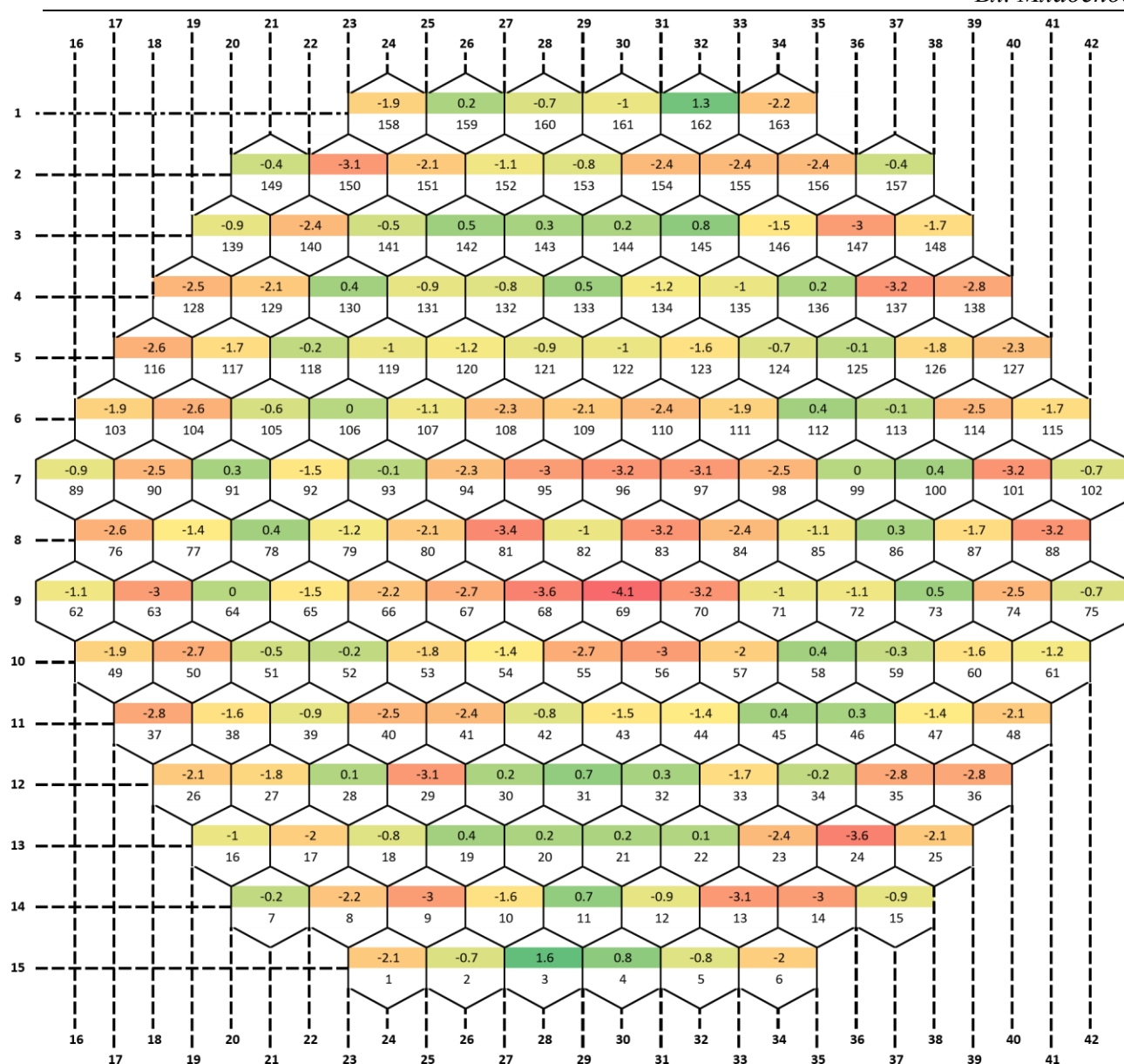


Максимално отклонение, %:	0.9
Минимално отклонение, %:	-5
Макс. абсолютно отклонение, %:	5
Стандартно отклонение на популацията:	1.408

Фигура 9-7. Сравнение на K_V по касети, слой 4, при 270 ефективни деңоноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

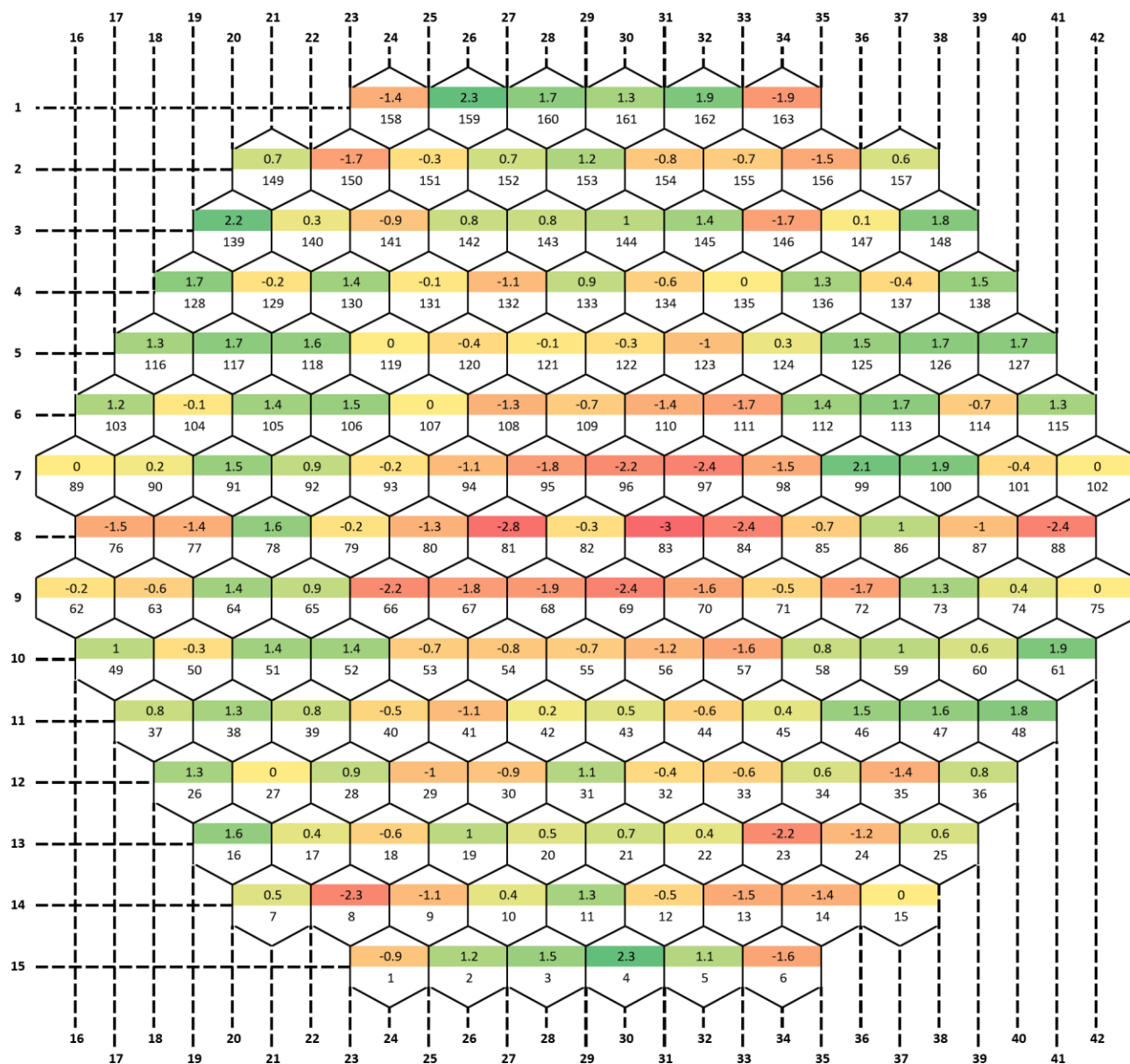


Максимално отклонение, %:	1.6
Минимално отклонение, %:	-4.1
Макс. абсолютно отклонение, %:	4.1
Стандартно отклонение на популацията:	1.223

Фигура 9-8. Сравнение на K_V по касети, слой 5, при 270 ефективни деноночия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

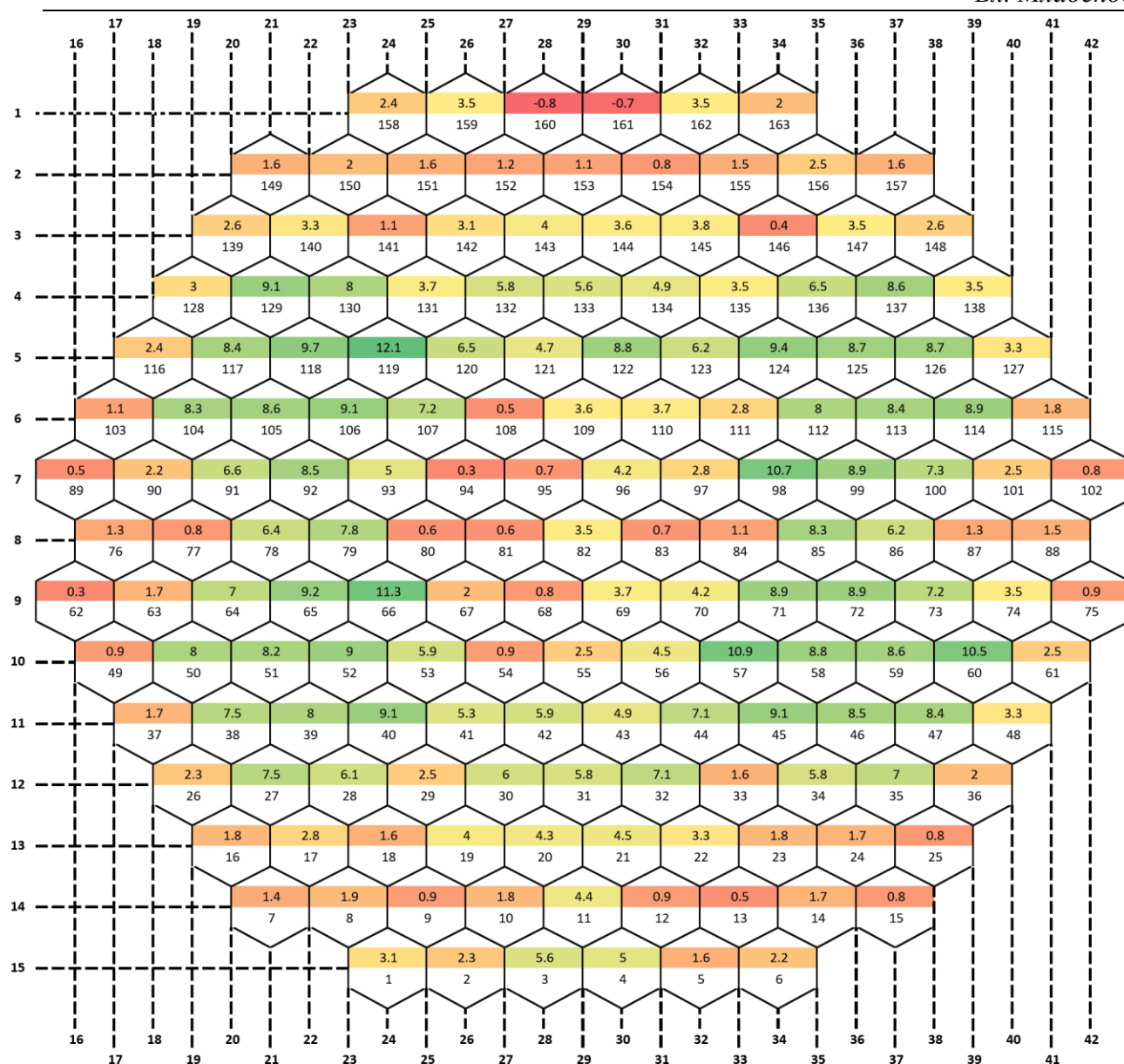


Максимално отклонение, %:	2.3
Минимално отклонение, %:	-3
Макс. абсолютно отклонение, %:	3
Стандартно отклонение на популацията:	1.274

Фигура 9-9. Сравнение на K_V по касети, слой 6, при 270 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

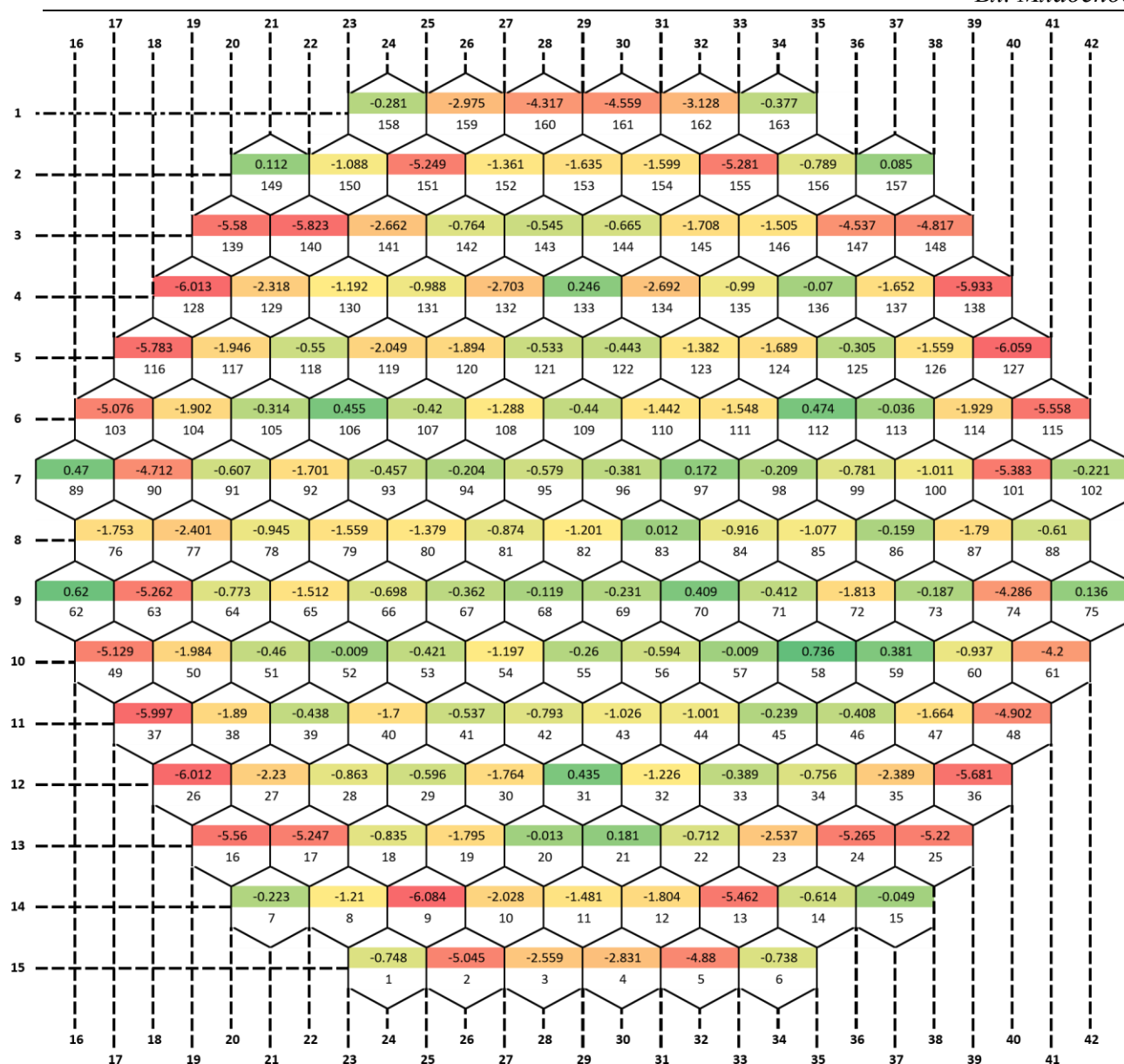


Максимално отклонение, %:	12.1
Минимално отклонение, %:	-0.8
Макс. абсолютно отклонение, %:	12.1
Стандартно отклонение на популацията:	3.114

Фигура 9-10. Сравнение на K_V по касети, слой 7, при 270 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

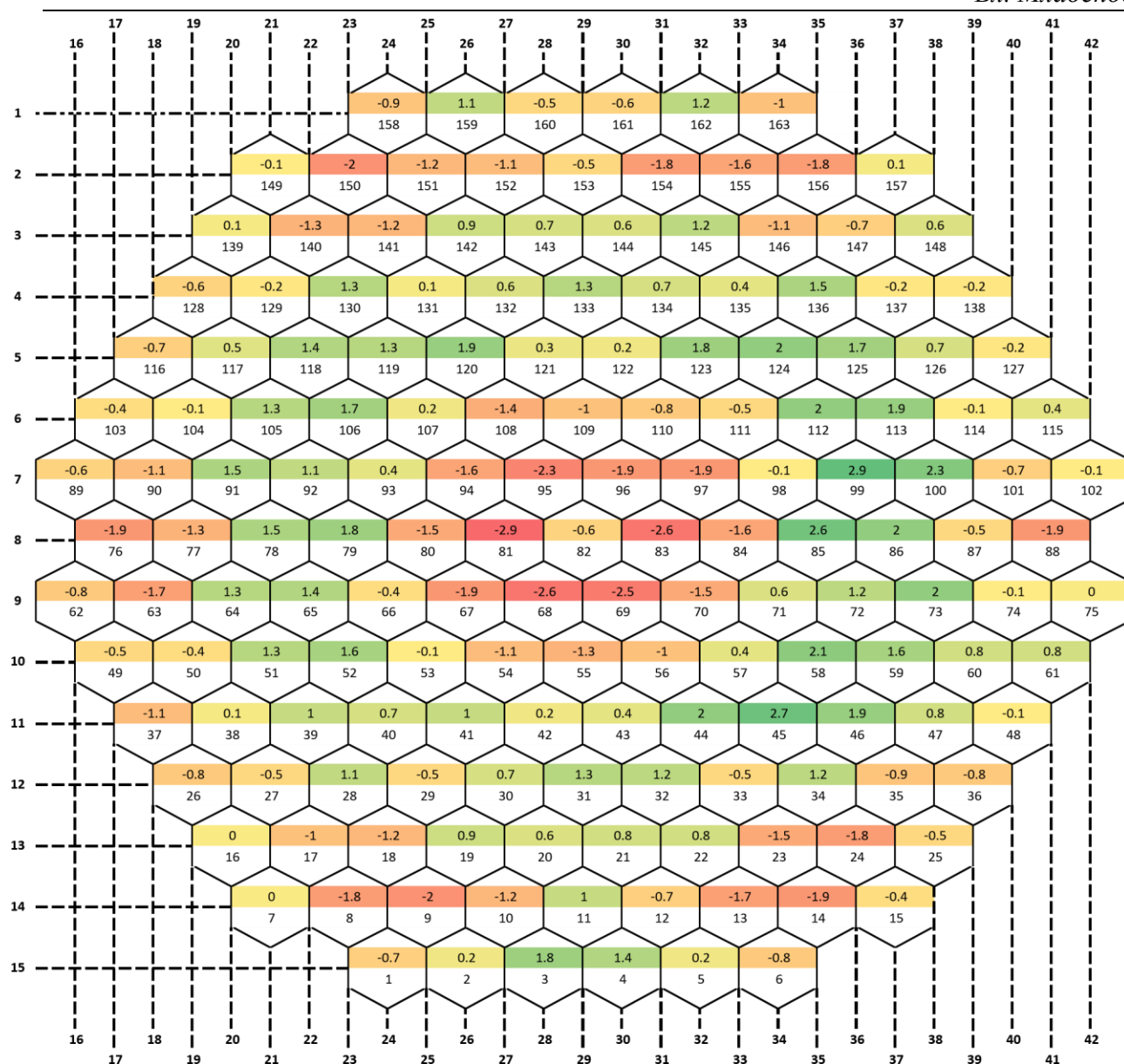


Максимално отклонение, %:	0.736
Минимално отклонение, %:	-6.084
Макс. абсолютно отклонение, %:	6.084
Стандартно отклонение на популацията:	1.902

Фигура 9-11. Сравнение на дълбочина на изгаряне (BU) по касети при 300 ефективни денонощия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

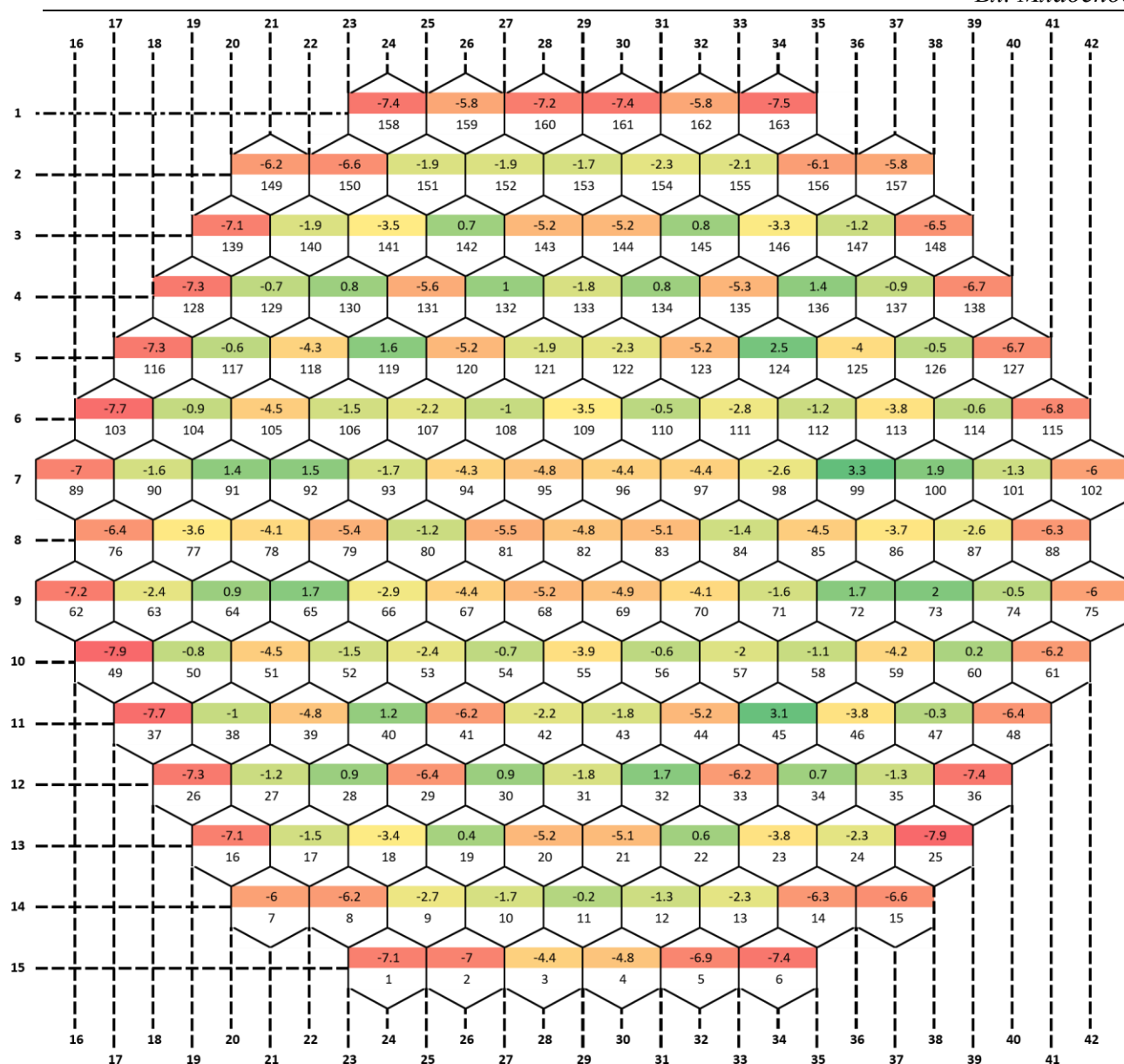


Максимално отклонение, %:	2.9
Минимално отклонение, %:	-2.9
Макс. абсолютно отклонение, %:	2.9
Стандартно отклонение на популацията:	1.271

Фигура 9-12. Сравнение на K_q по касети при 300 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

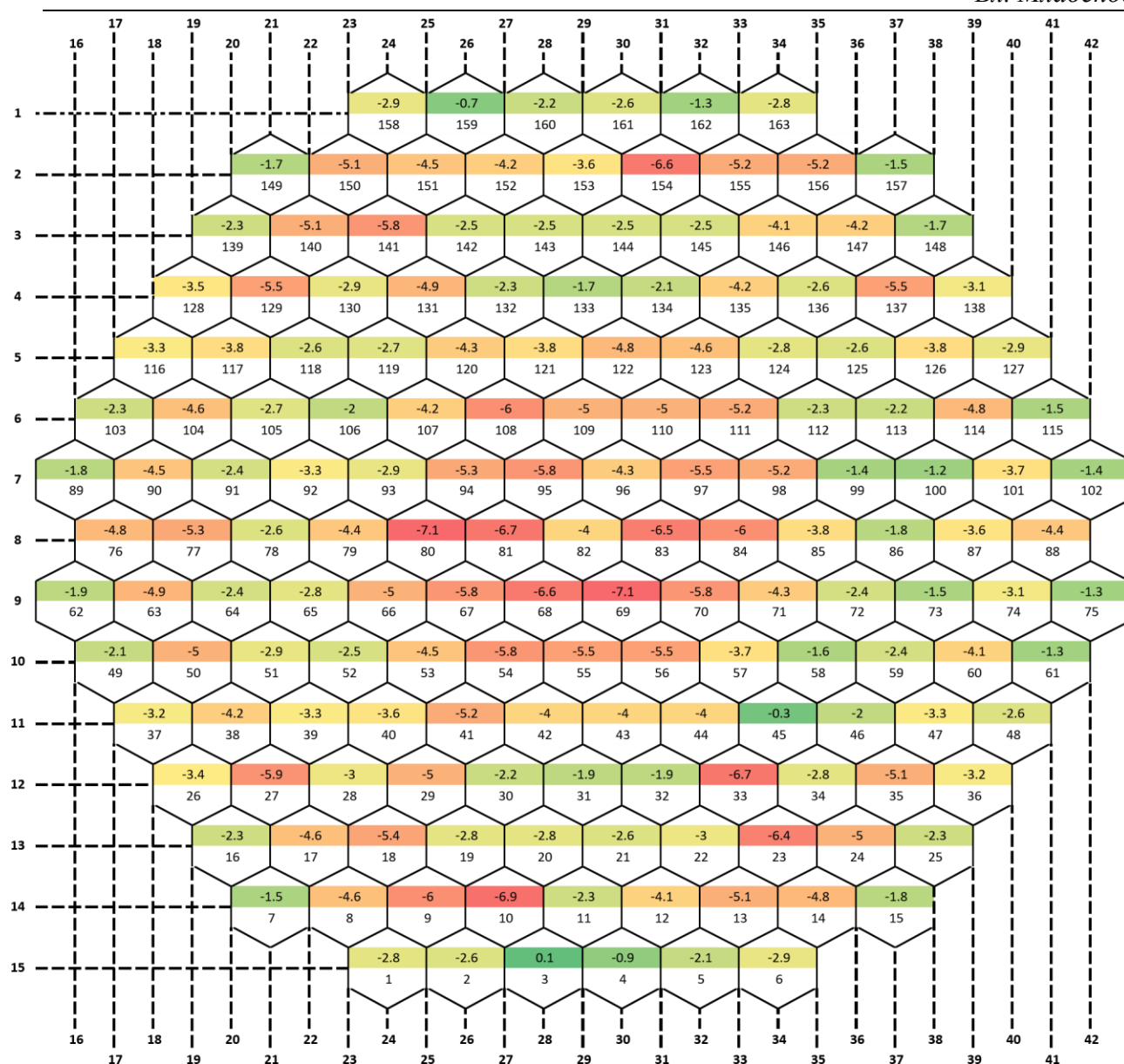


Максимално отклонение, %:	3.3
Минимално отклонение, %:	-7.9
Макс. абсолютно отклонение, %:	7.9
Стандартно отклонение на популацията:	2.887

Фигура 9-13. Сравнение на K_r по касети при 300 ефективни денонощия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

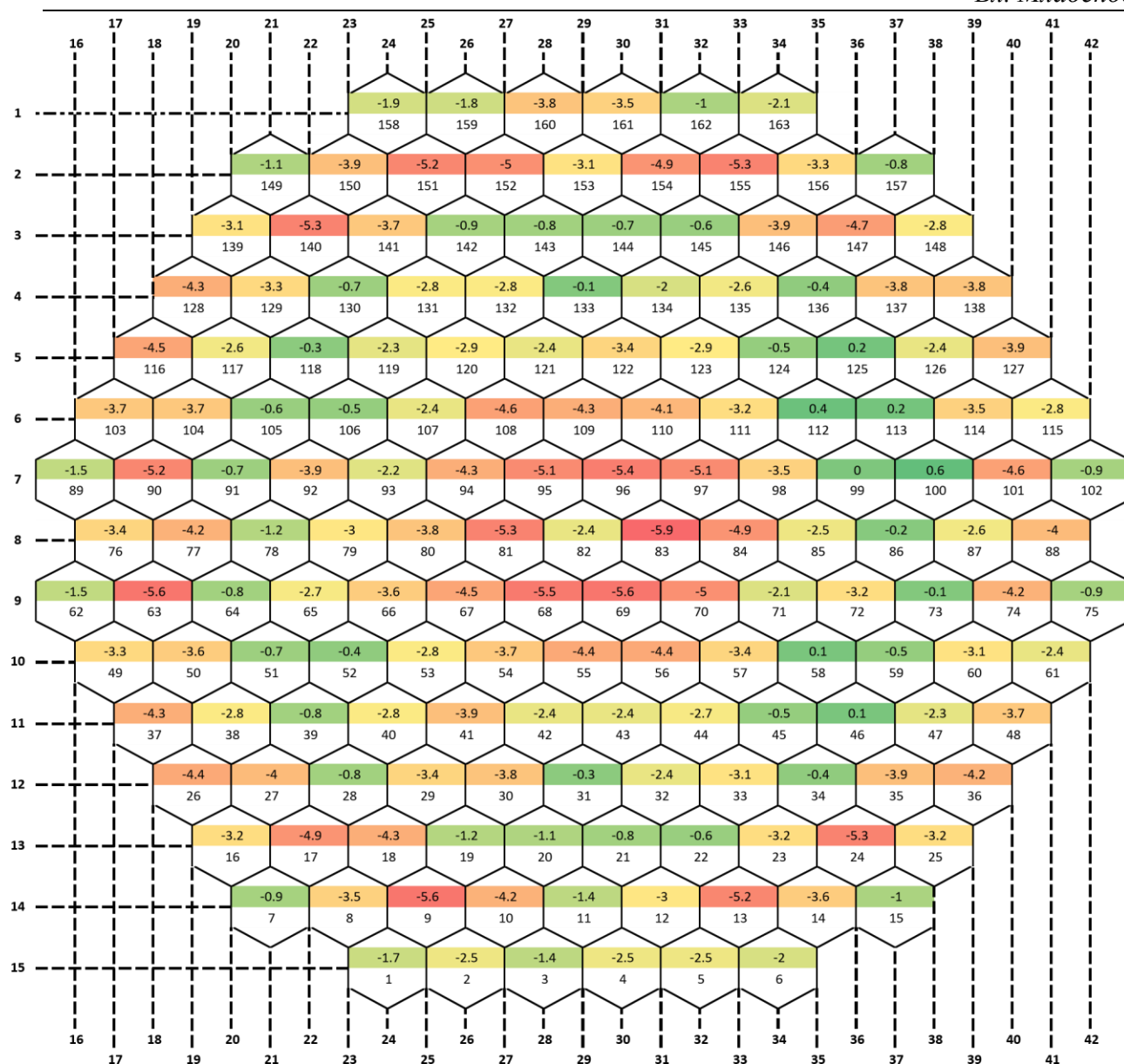


Максимално отклонение, %:	0.1
Минимално отклонение, %:	-7.1
Макс. абсолютно отклонение, %:	7.1
Стандартно отклонение на популацията:	1.568

Фигура 9-14. Сравнение на K_V по касети, слой 1, при 300 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

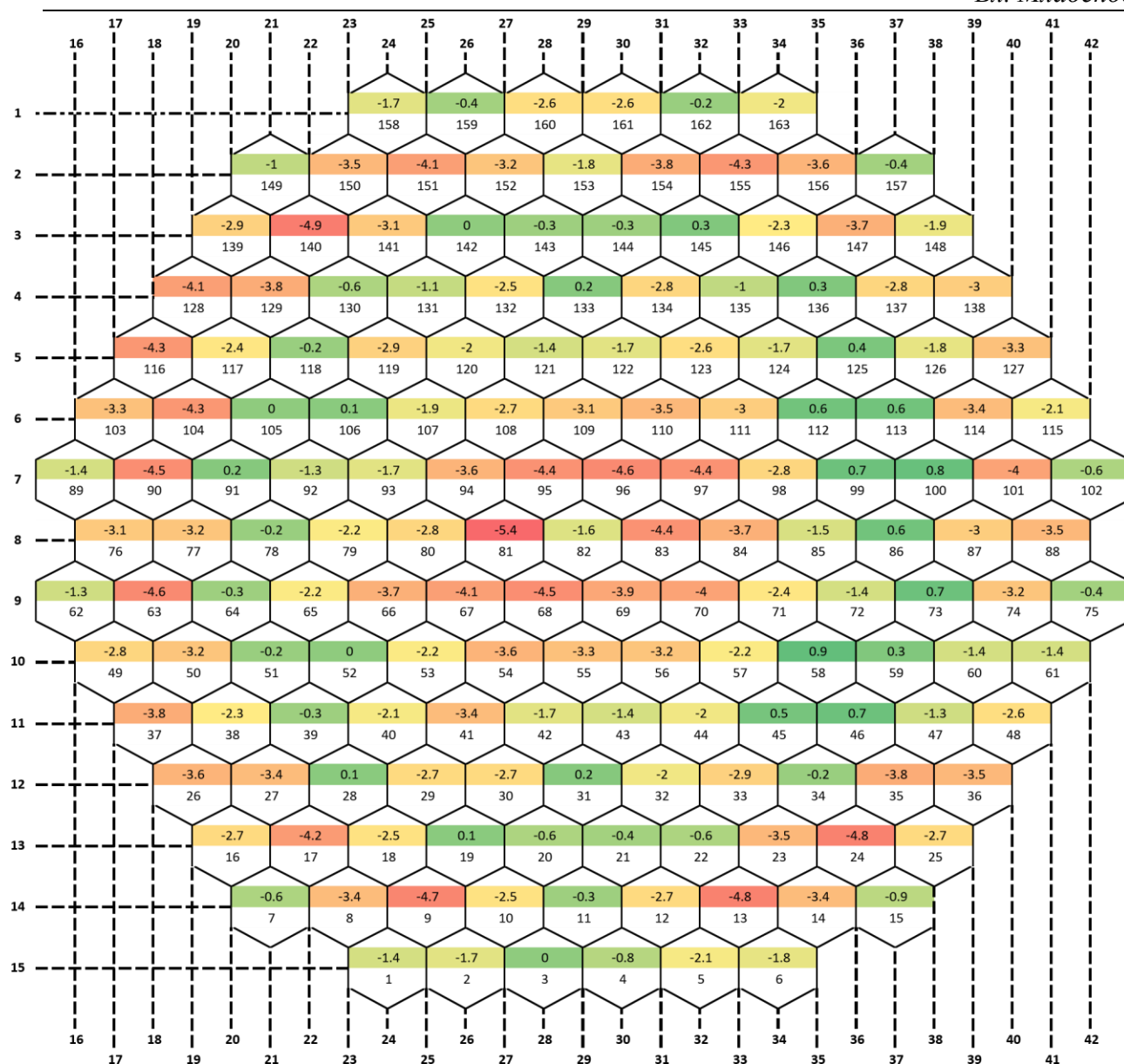


Максимално отклонение, %:	0.6
Минимално отклонение, %:	-5.9
Макс. абсолютно отклонение, %:	5.9
Стандартно отклонение на популацията:	1.631

Фигура 9-15. Сравнение на K_V по касети, слой 2, при 300 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

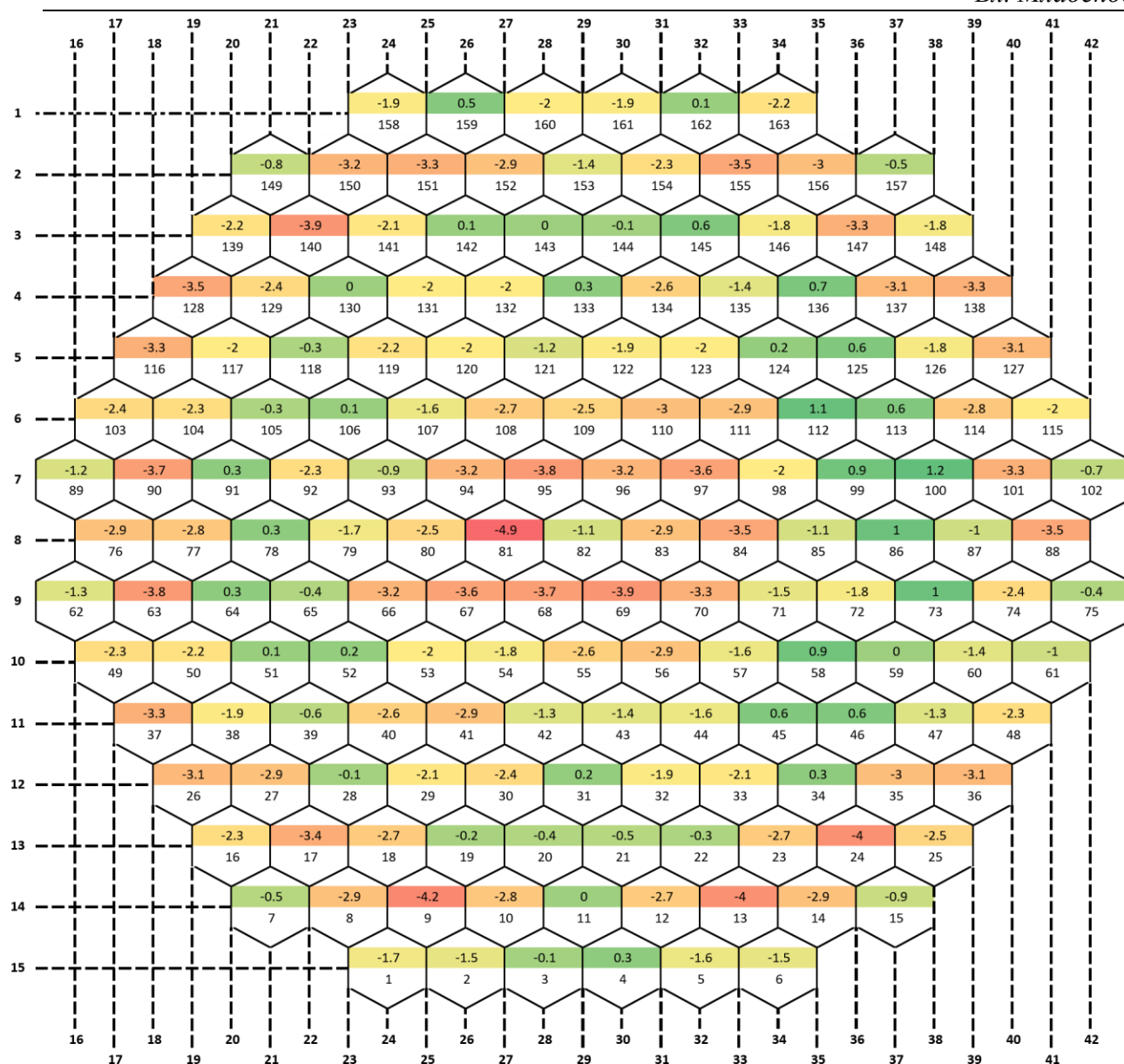


Максимално отклонение, %:	0.9
Минимално отклонение, %:	-5.4
Макс. абсолютно отклонение, %:	5.4
Стандартно отклонение на популацията:	1.574

Фигура 9-16. Сравнение на K_V по касети, слой 3, при 300 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

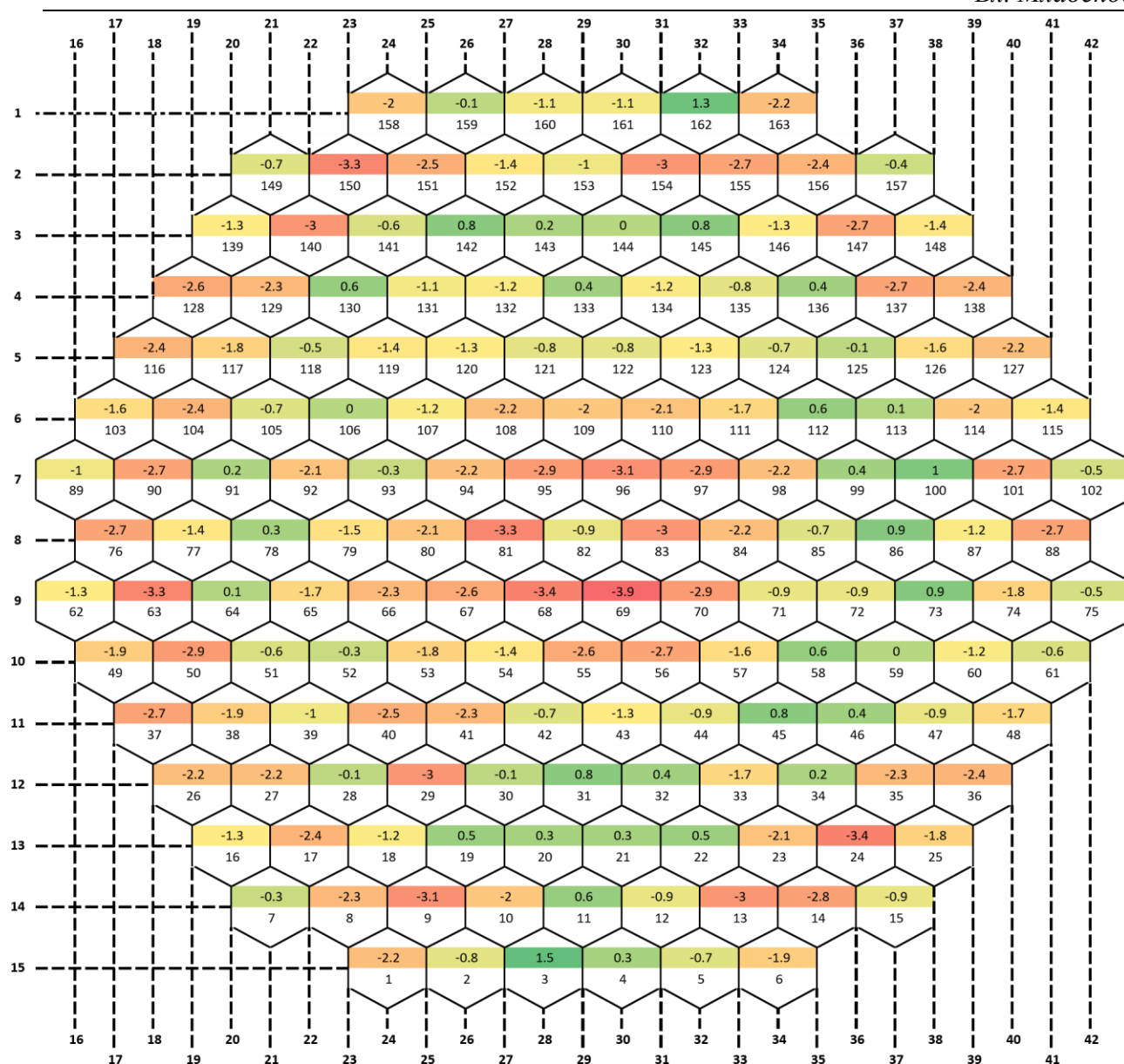


Максимално отклонение, %:	1.2
Минимално отклонение, %:	-4.9
Макс. абсолютно отклонение, %:	4.9
Стандартно отклонение на популацията:	1.404

Фигура 9-17. Сравнение на K_V по касети, слой 4, при 300 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

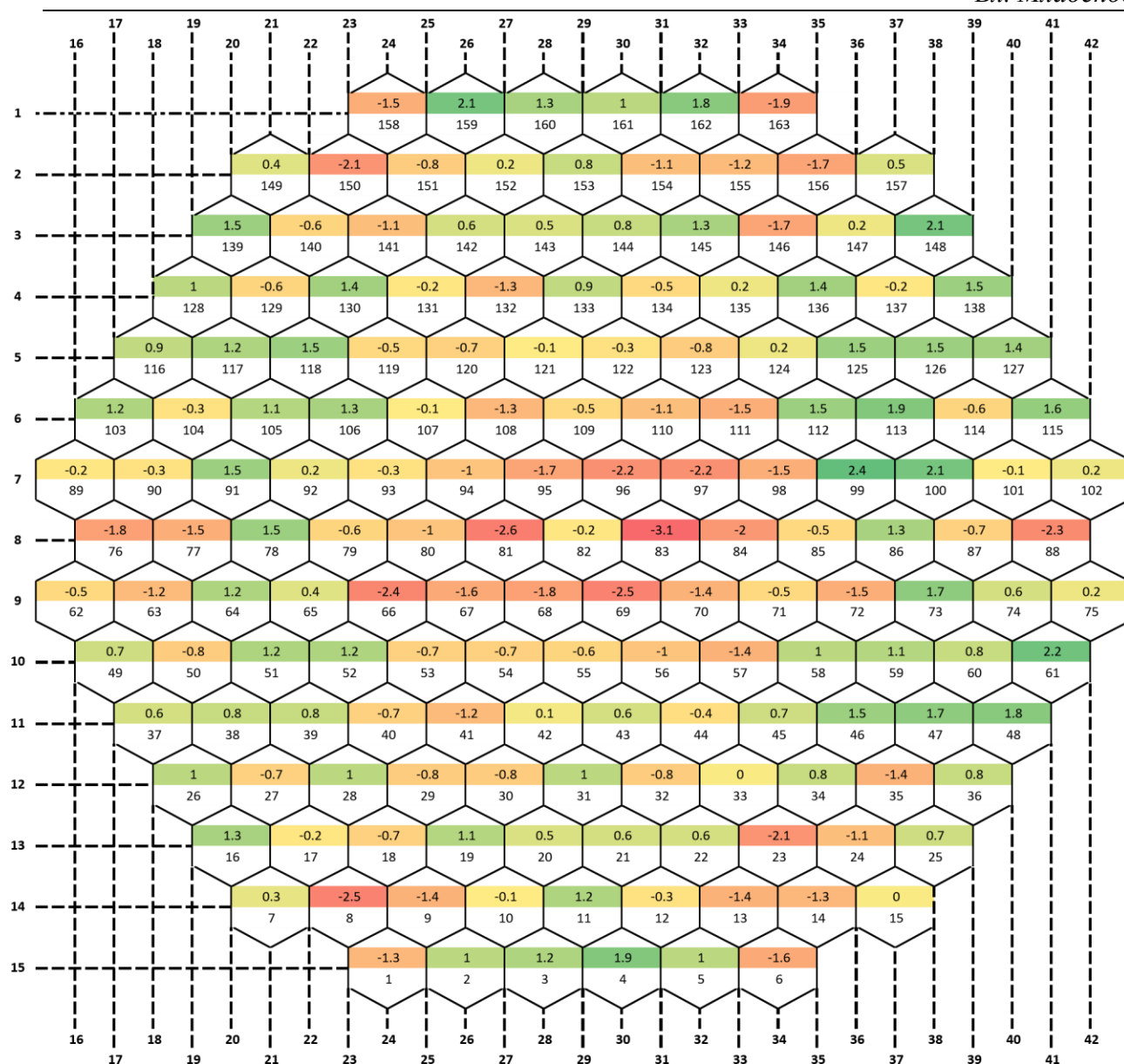


Максимално отклонение, %:	1.5
Минимално отклонение, %:	-3.9
Макс. абсолютно отклонение, %:	3.9
Стандартно отклонение на популацията:	1.213

Фигура 9-18. Сравнение на K_V по касети, слой 5, при 300 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

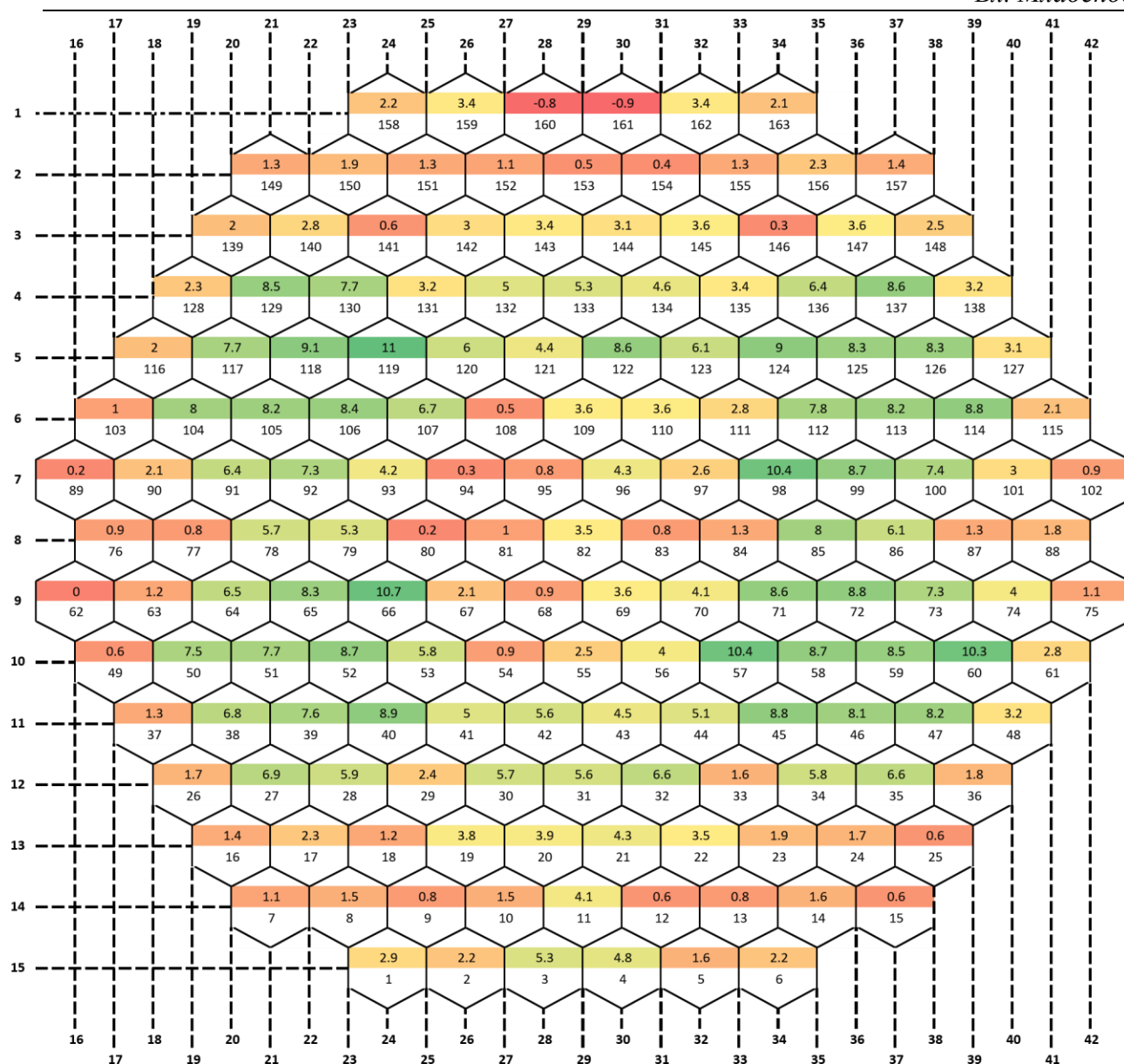


Максимално отклонение, %:	2.4
Минимално отклонение, %:	-3.1
Макс. абсолютно отклонение, %:	3.1
Стандартно отклонение на популацията:	1.241

Фигура 9-19. Сравнение на K_V по касети, слой 6, при 300 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

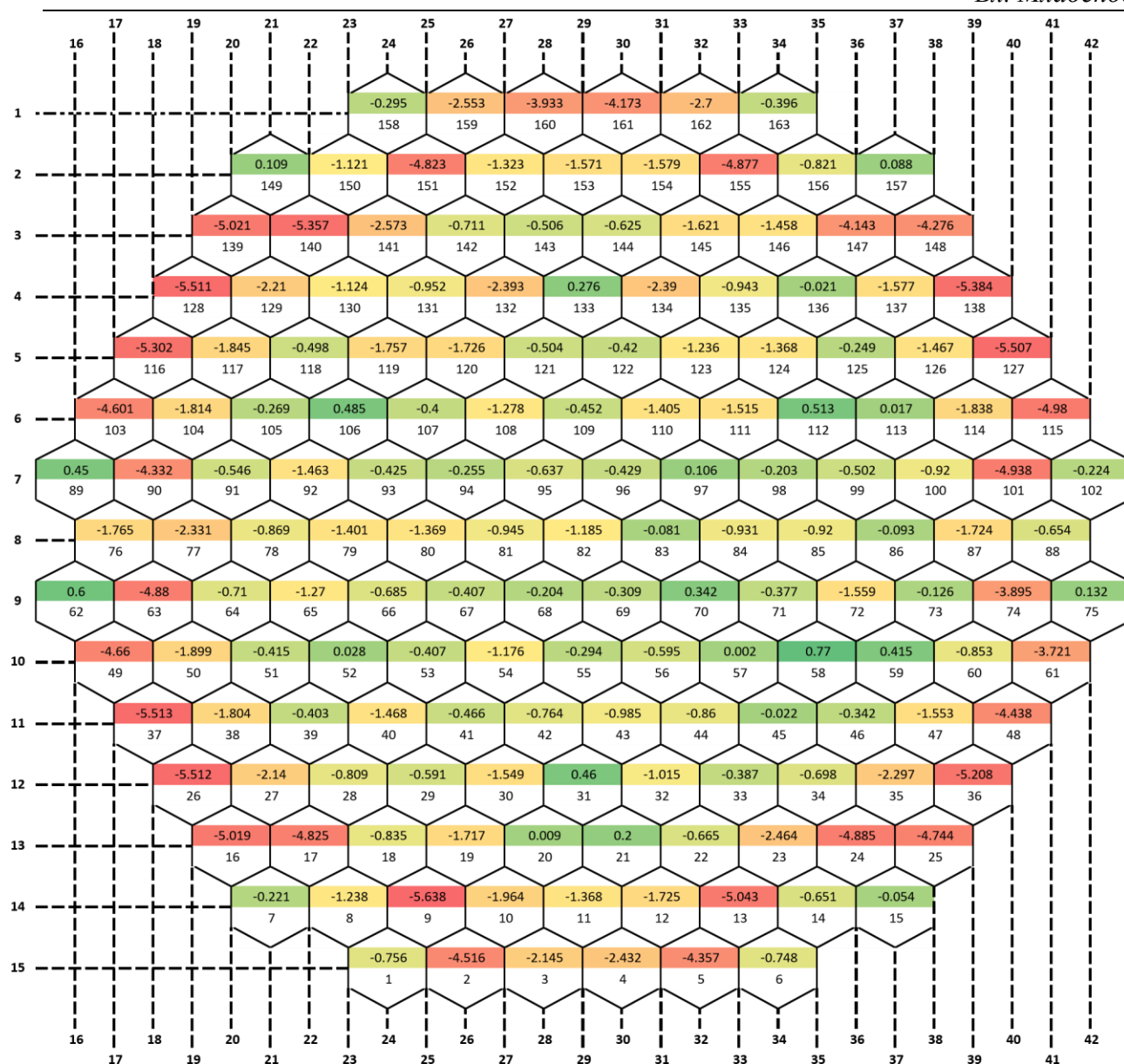


Максимално отклонение, %:	11
Минимално отклонение, %:	-0.9
Макс. абсолютно отклонение, %:	11
Стандартно отклонение на популацията:	2.991

Фигура 9-20. Сравнение на K_{eff} по касети, слой 7, при 300 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

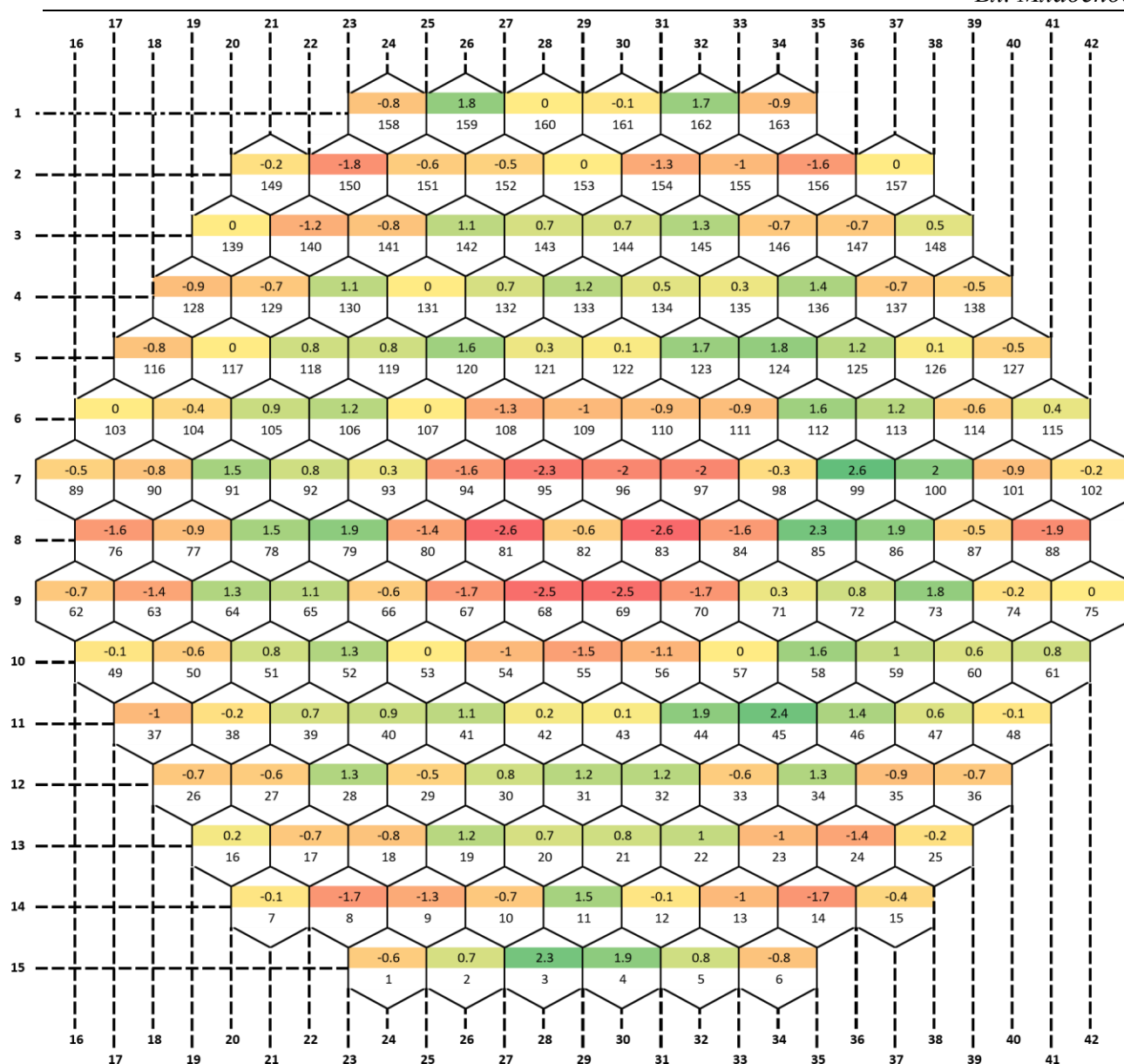


Максимално отклонение, %:	0.77
Минимално отклонение, %:	-5.638
Макс. абсолютно отклонение, %:	5.638
Стандартно отклонение на популацията:	1.733

Фигура 9-21. Сравнение на дълбочина на изгаряне (BU) по касети при 330 ефективни денонощия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

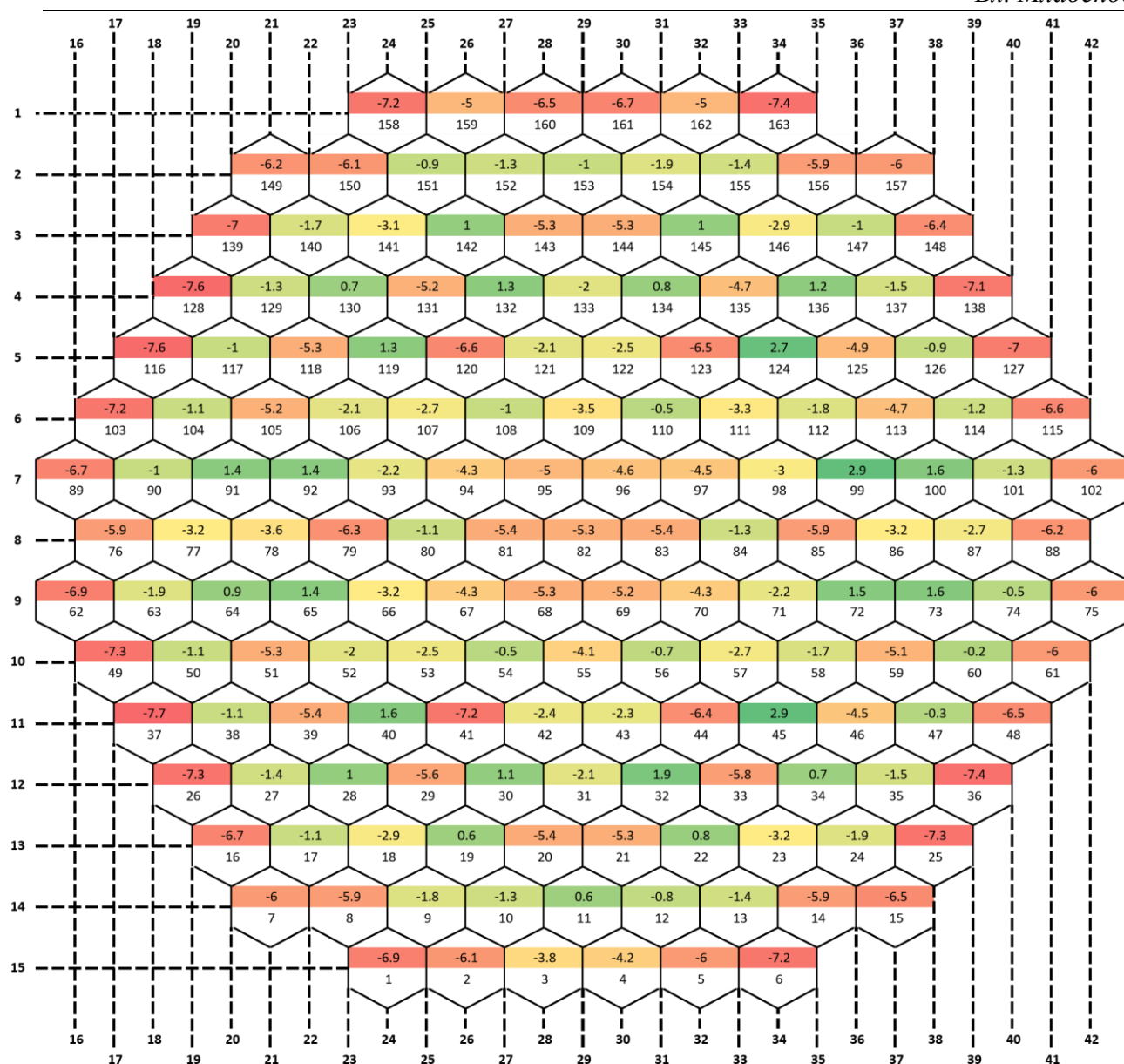


Максимално отклонение, %:	2.6
Минимално отклонение, %:	-2.6
Макс. абсолютно отклонение, %:	2.6
Стандартно отклонение на популацията:	1.166

Фигура 9-22. Сравнение на K_q по касети при 330 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

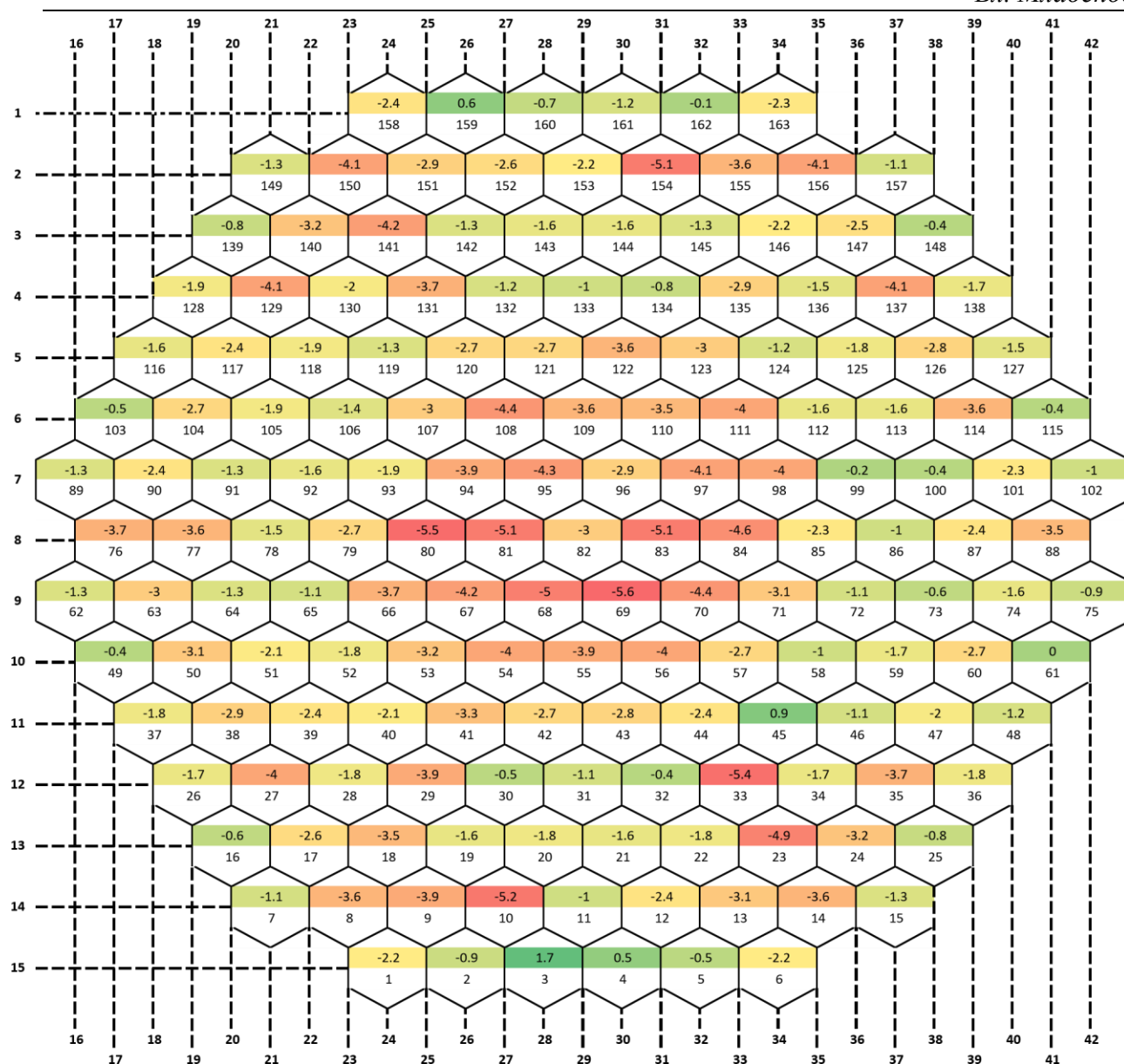


Максимално отклонение, %:	2.9
Минимално отклонение, %:	-7.7
Макс. абсолютно отклонение, %:	7.7
Стандартно отклонение на популацията:	2.866

Фигура 9-23. Сравнение на K_r по касети при 330 ефективни денонощия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

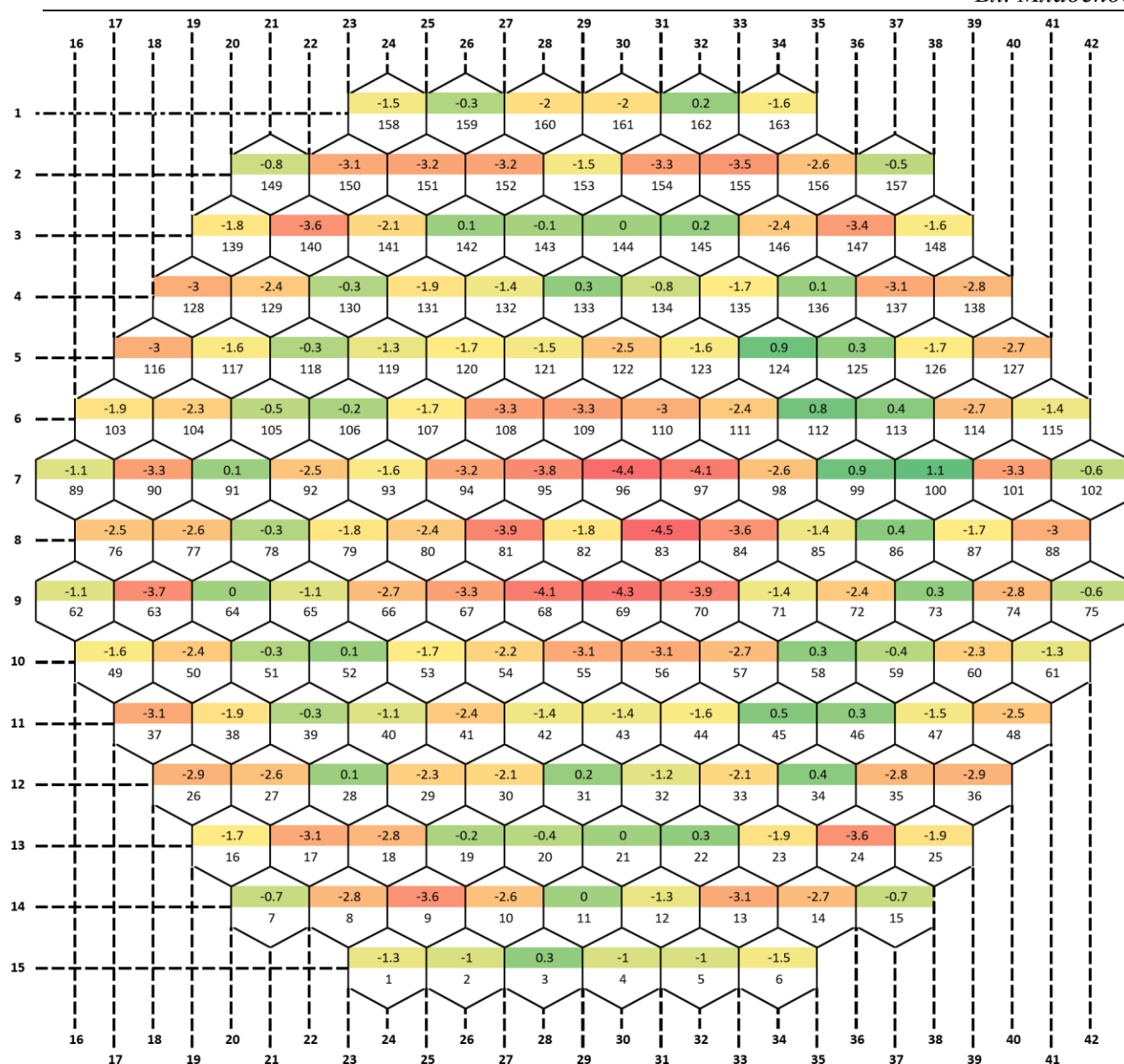


Максимално отклонение, %:	1.7
Минимално отклонение, %:	-5.6
Макс. абсолютно отклонение, %:	5.6
Стандартно отклонение на популацията:	1.409

Фигура 9-24. Сравнение на K_U по касети, слой 1, при 330 ефективни денонощия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

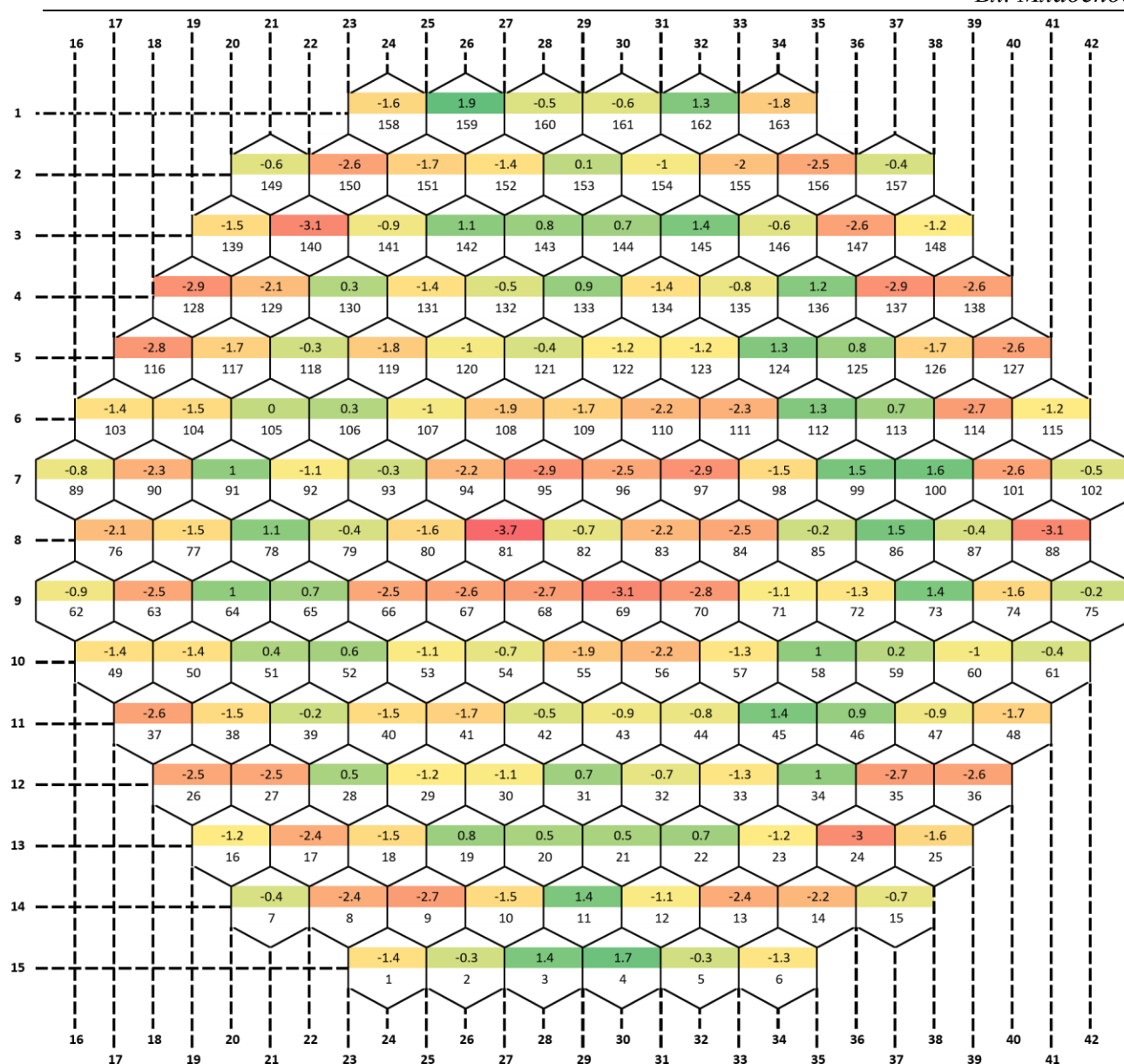


Максимално отклонение, %:	1.1
Минимално отклонение, %:	-4.5
Макс. абсолютно отклонение, %:	4.5
Стандартно отклонение на популацията:	1.331

Фигура 9-25. Сравнение на K_U по касети, слой 2, при 330 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

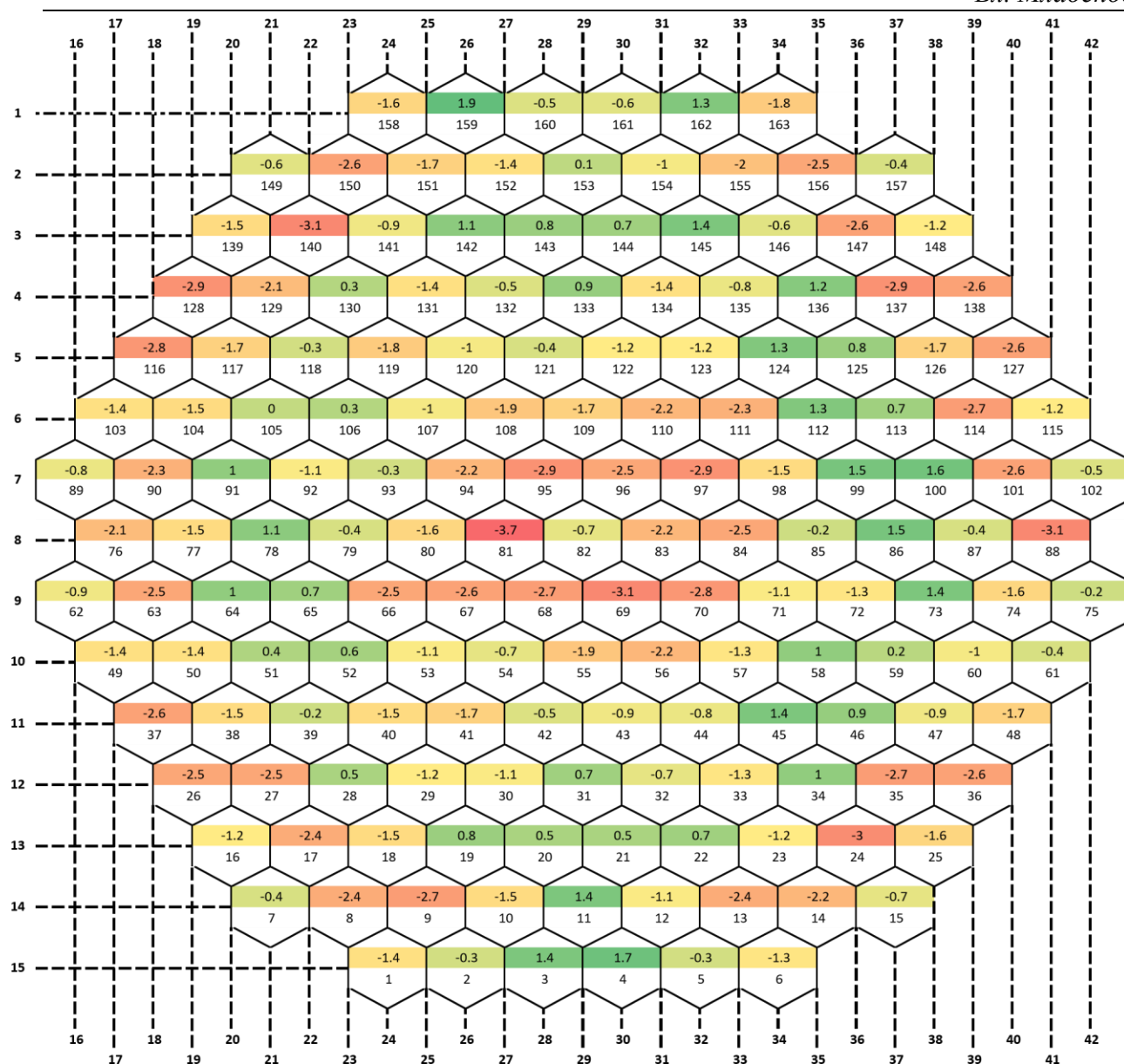


Максимално отклонение, %:	1.9
Минимално отклонение, %:	-3.7
Макс. абсолютно отклонение, %:	3.7
Стандартно отклонение на популацията:	1.336

Фигура 9-26. Сравнение на K_U по касети, слой 3, при 330 ефективни денонощия.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

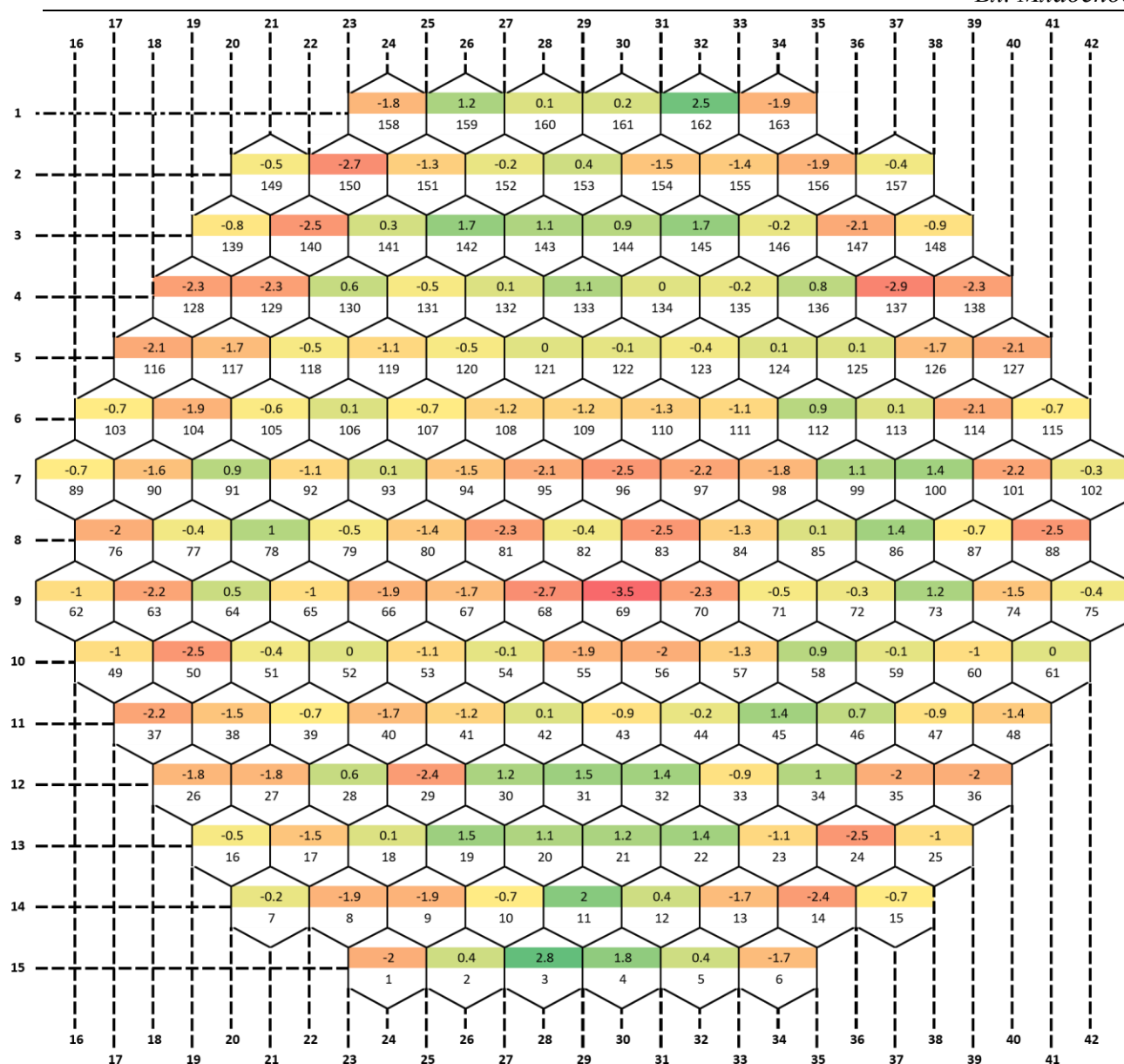


Максимално отклонение, %:	1.9
Минимално отклонение, %:	-3.7
Макс. абсолютно отклонение, %:	3.7
Стандартно отклонение на популацията:	1.336

Фигура 9-27. Сравнение на K_U по касети, слой 4, при 330 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

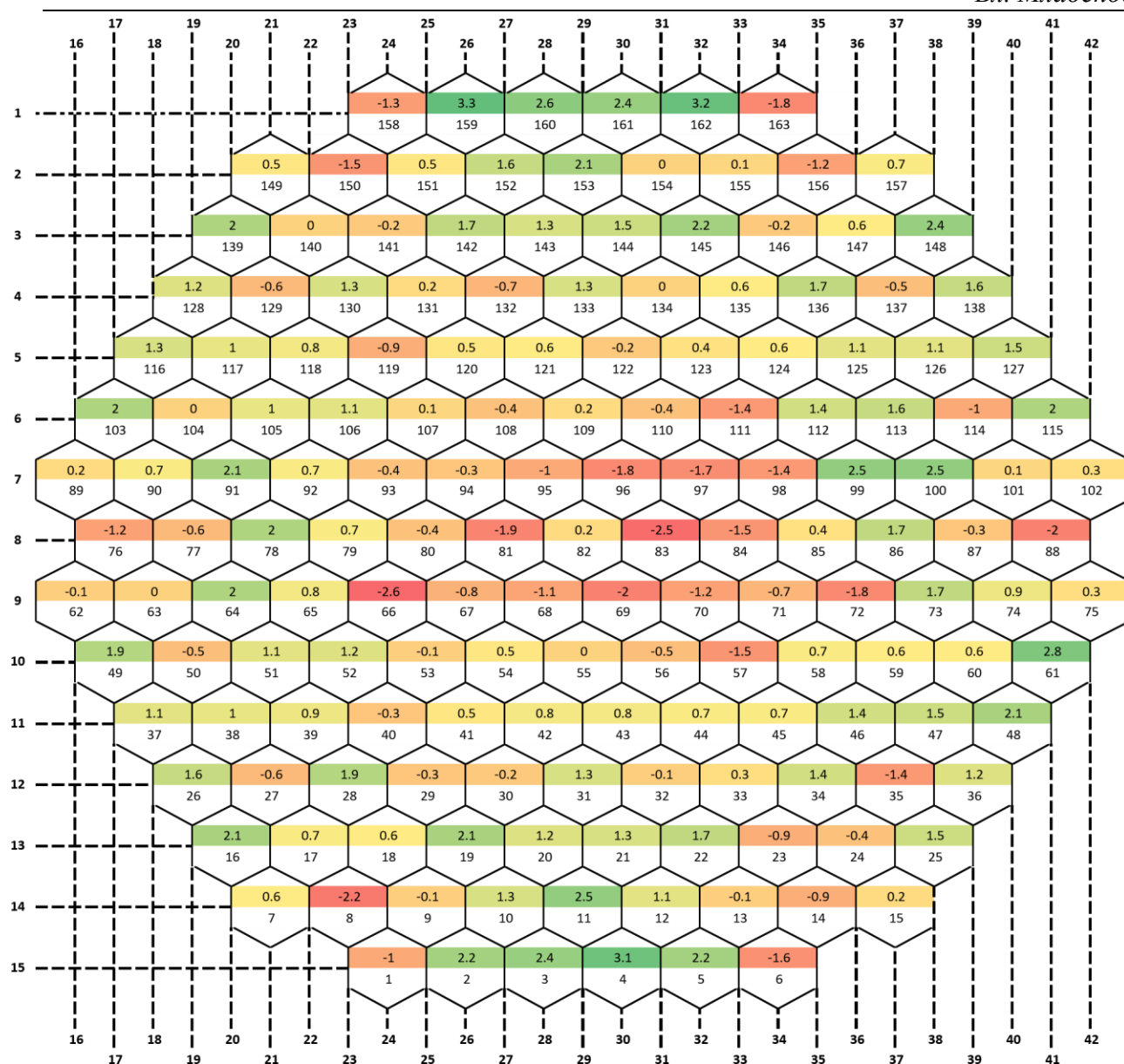


Максимално отклонение, %:	2.8
Минимално отклонение, %:	-3.5
Макс. абсолютно отклонение, %:	3.5
Стандартно отклонение на популацията:	1.278

Фигура 9-28. Сравнение на K_U по касети, слой 5, при 330 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов

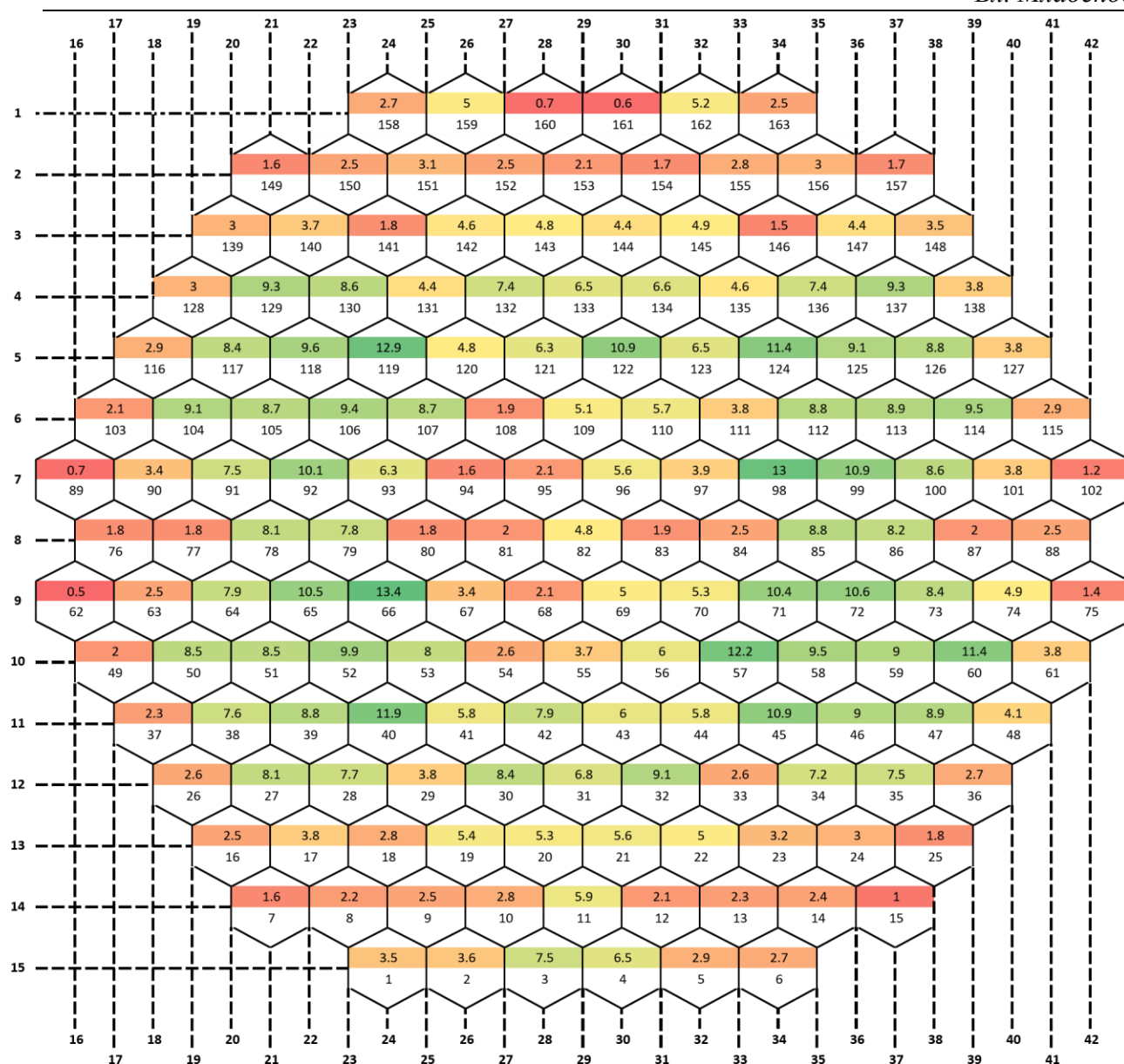


Максимално отклонение, %:	3.3
Минимално отклонение, %:	-2.6
Макс. абсолютно отклонение, %:	3.3
Стандартно отклонение на популацията:	1.271

Фигура 9-29. Сравнение на K_v по касети, слой 6, при 330 ефективни деноноция.

Сравнение на параметрите на енерго-отделяне на активната зона на ВВЕР-1000, изчислени със СВРК-М и BEACON™. Анализ на резултатите.

Бл. Младенов



Максимално отклонение, %:	13.4
Минимално отклонение, %:	0.5
Макс. абсолютно отклонение, %:	13.4
Стандартно отклонение на популацията:	3.182

Фигура 9-30. Сравнение на K_U по касети, слой 7, при 330 ефективни денонощия.