

СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“



Дипломна работа

За придобиване на образователно-квалификационна степен

Магистър

**Разработка и приложение на 3D-принтиран фантом за
периодичен контрол на качеството при мамографски уредби**

Мартин Цветков

Факултетен номер: **8PH3500031**

Специалност: **Медицинска физика**

Научен ръководител:

д-р Георги Георгиев, Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски“

Научен консултант:

доц. д-р Красимир Митев, Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски“

Физически факултет, София, 2026 г.

Благодарности

Настоящата дипломна работа е резултат от съвместните усилия, професионалната подкрепа и съдействието на специалисти в областта на медицинската физика, на които бих желал да изразя своята искрена благодарност.

На първо място благодаря на научния ми ръководител д-р Георги Георгиев за отделеното време, професионалните насоки и мотивиращата подкрепа по време на целия процес по разработване на дипломната работа. Неговият богат опит и препоръки бяха безценни за успешното завършване на настоящия проект.

Специално благодаря на д-р Емил Георгиев, който оказва съдействие при клиничните тестове на разработения фантом и предостави възможност за неговото изследване в реални условия на работа с мамографска система, като най-често това се случваше в почивни и неработни за него дни.

Благодаря на научния ми консултант доц. д-р Красимир Митев, който допусна избраната тема, като по този начин позволи нейното развитие.

Благодарности и на всички колеги, които с идеи, съвети или техническа помощ допринесоха за реализирането на проекта.

Списък с използвани съкращения

3D – Three-Dimensional (Триизмерен)

AEC – Automatic Exposure Control (Автоматичен контрол на експонацията)

CAD – Computer-Aided Design (Компютърно подпомагано проектиране)

DICOM – Digital Imaging and Communications in Medicine (Стандарт за цифрови медицински изображения и комуникация)

FDM – Fused Deposition Modeling (Моделиране чрез отлагане на разтопен материал)

kV – Kilovoltage (Анодно напрежение)

kVp – Peak Kilovoltage (Пиково анодно напрежение)

mAs – Milliampere-second (Количество електричество)

MicroDicom – Medical DICOM Viewer (Софтуер за визуализация и анализ на DICOM изображения)

QA – Quality Assurance (Осигуряване на качеството)

ROI – Region of Interest (Област на интерес)

SD – Standard Deviation (Стандартно отклонение)

КК – Контрол на качеството

Съдържание

1	Увод	7
1.1	Мамография – същност, физични принципи и клинично значение	7
1.2	Контрол на качеството в мамографията – принципи, организация и методи.....	8
1.3	Необходимост от нискобюджетен 3D-принтиран фантом – анализ на ситуацията в България.....	9
1.4	Роля на 3D-принтирането в разработването на фантоми.....	10
1.5	Цели и обосновка на настоящото изследване	11
2	Материали и методи	12
2.1	3D-принтиране – описание на процеса на 3D-принтиране и използваните материали	12
2.2	Избор и обосновка на материала за 3D-принтиране	14
2.3	CAD 3D процес на моделиране на фантома.....	15
2.4	3D-принтиране и финална версия на фантома.....	17
2.5	Производствен процес и параметри на принтиране.....	19
2.6	Състав и провеждане на контрол на качеството с 3D-принтираният фантом ...	21
2.6.1	Тест 1. Проверка на позиционирането и колимацията (Фигура 7, Обекти 1a–1b)	25
2.6.2	Тест 2. Проверка на визуализацията на линейни вложки (Обекти 2a–2f) ..	25
2.6.3	Тест 3. Проверка на пространствената разделителна способност (Фигура 7, Обекти 3a–3d)	26
2.6.4	Тест 4. Проверка на визуализацията на микрокалцификати (Фигура 7, Обекти 4a–4f).....	26
2.6.5	Тест 5. Оценка на хомогенните материали (Фигура 7, Обекти 5-8)	26
2.6.6	Тест 6. Оценка на композитните материали (Фигура 7, Обекти 9-11)	27
2.7	Клинично тестване на 3D-принтираният фантом в лечебни заведения и Методика за анализ на изображенията	28
2.8	Провеждане на КК и оценка на възпроизводимостта	30
2.9	Тест за регистриране на клинично значими отклонения.....	31

2.10	Шаблон на използваните протоколи за КК	33
2.11	Ограничения на метода и бъдещо развитие	38
3	Резултати	40
3.1	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 40mAs/26kV (клиничен протокол, четири сканирания).....	41
3.2	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 40mAs/28kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	42
3.3	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 40mAs/30kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	43
3.4	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 40mAs/24kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	43
3.5	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 40mAs/22kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	44
3.6	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 26mAs/36kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	45
3.7	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 32mAs/26kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	46
3.8	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 45mAs/26kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	46
3.9	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 50mAs/26kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	47
3.10	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 50mAs/24kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	48
3.11	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 50mAs/22kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	49
3.12	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 50mAs/28kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	50
3.13	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 50mAs/30kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	50

3.14	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 28mAs/24kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	51
3.15	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 28mAs/22kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	52
3.16	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 28mAs/28kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	53
3.17	Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 28mAs/30kV (увеличени kV, mAs без промяна).....	53
3.18	Входната доза при различни параметри на kV и mAs.....	54
4	Дискусия и анализ на резултатите	55
4.1	Маркери за размер на полето.....	55
4.2	Групи микрокалцификации	55
4.3	Линейни вложки	56
4.4	Решетки за пространствена разделителна способност	57
4.5	Капсули.....	58
4.5.1	Анализ на резултатите за капсула – вода	58
4.5.2	Анализ на резултатите за капсула – олио	60
4.5.3	Анализ на резултатите за капсула – калциев карбонат	62
4.5.4	Анализ на резултатите за капсула – 100% парафин	64
4.5.5	Анализ на резултатите за капсула – 75% парафин/25% калциев карбонат. 66	
4.5.6	Анализ на резултатите за капсула – 50% парафин/50% калциев карбонат. 68	
4.5.7	Анализ на резултатите за капсула – 25% парафин/75% калциев карбонат. 70	
4.6	Анализ на резултатите за входната доза при различни параметри на kV и mAs ..	72
5	Заклучение.....	74
6	Приложения.....	77
6.1	Приложение №1 – Резултати от сканиране на фантома с различни протоколи на мамографската уредба:.....	77

6.2	Приложение №2 – Приет за устна презентация доклад в European Congress of Medical Physics, Valencia, Spain 2026	77
7	Библиография	78

1 Увод

1.1 Мамография – същност, физични принципи и клинично значение

Мамографията е специализиран метод от диагностичната рентгенология, предназначен за изобразяване на структурата на млечната жлеза с висока пространствена и контрастна разделителна способност. Тя използва нискоенергийно рентгеново лъчение (обикновено в диапазона 20–35 kVp), което позволява оптимално разграничаване между различните тъкани – мастна, жлезиста и патологично променена. Основното ѝ приложение е ранната диагностика на рак на гърдата – едно от най-честите онкологични заболявания при жените в световен мащаб [1], [2].

Физичният принцип на мамографията се базира на различията в линейния коефициент на отслабване на рентгеновото лъчение в различните тъкани. Жлезистата тъкан има по-висока плътност и съответно по-голямо отслабване в сравнение с мастната, което позволява създаването на контраст в изображението. За постигане на оптимален баланс между контраст и доза се използват специфични анодно-филтърни комбинации и автоматични системи за контрол на експонация. (AEC) [3].

Мамографията се прилага както в скринингов, така и в диагностичен режим. Скрининговата мамография има за цел ранно откриване на асимптоматични лезии, което значително подобрява преживяемостта на пациентите [2]. Диагностичната мамография се използва при наличие на клинични симптоми и често се комбинира с други образни методи като ултразвук и магнитно-резонансна томография.

Съвременните мамографски системи са предимно дигитални, като все по-широко приложение намира и томосинтезата, която позволява триизмерна реконструкция на гърдата и намалява ефекта на наслагване на структури [4]. Качеството на изображението е от критично значение, тъй като диагностичната информация често се съдържа в много малки и нискоконтрастни детайли. Установено е, че успехът на мамографията зависи от способността да се генерират висококачествени изображения при минимална доза за пациента [5]. Влошаването на качеството може да доведе до пропускане на ранни патологични изменения или погрешна диагноза.

1.2 Контрол на качеството в мамографията – принципи, организация и методи

Контролът на качеството (КК) в мамографията представлява систематичен процес, насочен към поддържане на стабилна и оптимална работа на оборудването. Той е част от програмите за осигуряване на качеството и е регламентиран от международни стандарти [6], [7].

Основните цели на КК включват:

- осигуряване на диагностично надеждни изображения;
- минимизиране на радиационната доза;
- ранно откриване на технически проблеми;
- съответствие с нормативните изисквания.

КК се извършва на различни нива:

- ежедневен;
- седмичен;
- месечен;
- годишен.

Ежедневният и седмичният контрол са насочени към проследяване на постоянството на качеството на изображението и ранно откриване на отклонения в работата на системата, докато **месечният и годишният контрол** включват по-задълбочени технически проверки и измервания, извършвани с цел цялостна оценка на работоспособността, безопасността и съответствието на апаратурата с нормативните изисквания. Ключов елемент в КК са мамографските фантоми. Те симулират структурата на човешката гърда и съдържат тест-обекти като влакна, микрокалцификации и маси [8]. Типичният фантом имитира компресирана гърда с дебелина около 4.2–4.5 cm и включва обекти с различни размери и контраст [9].

Фантомните тестове позволяват количествена оценка на качеството на изображението. За приемливо качество е необходимо да се визуализират минимум четири влакна, три групи микрокалцификации и три маси [5].

Допълнително се оценяват:

- оптична плътност;
- контраст;
- артефакти;
- стабилност на експозицията.

Фантомите съдържат обекти с размери от лесно видими до гранично детектируеми, което позволява оценка на чувствителността на системата [9]. Те са проектирани да симулират клинични структури, свързани с ранни стадии на рак на гърдата [10].

Рутинното използване на фантоми позволява откриване на изменения в работата на системата, преди те да повлияят на клиничната диагностика [10].

1.3 Необходимост от нискобюджетен 3D-принтиран фантом – анализ на ситуацията в България

Въпреки наличието на ясни стандарти, практическото им прилагане често е ограничено. В резултат от тематична проверка през 2025 г. в югозападния регион на България беше установено, че над 50% от лечебните заведения не провеждат седмичен КК, а разчитат основно на КК, провеждан от външна фирма през 6–12 месеца.

Основните причини включват:

- **Недостиг на персонал** – липса на обучени специалисти за регулярни тестове;
- **Липса на фантоми** – високата цена на комерсиалните решения ограничава тяхната наличност;
- **Липса на софтуер** – отсъствие на инструменти за анализ;
- **Организационни ограничения** – приоритет на клиничната дейност.

Тази ситуация създава риск от незабелязано влошаване на качеството на изображението, което може да доведе до пропуски в диагностиката.

1.4 Роля на 3D-принтирането в разработването на фантоми

Комерсиалните фантоми за периодичен контрол на качеството (КК) в мамографията са стандартизирани устройства, предназначени да симулират рентгеновото отслабване и структурата на компресирана човешка гърда (~4–5 cm, ~50% жлезиста/50% мастна тъкан). Най-широко използвани са акредитационните фантоми като Gammex 156 Mammographic Accreditation Phantom, CIRS Model 015 Mammography Phantom и Supertech Model 03-502-ST Phantom, които съдържат тест-обекти (влакна, микрокалцификати и маси) за количествена оценка на пространствена разделителна способност, контраст и детектируемост [16]–[18]. Те представляват „златен стандарт“ за акредитация и периодичен КК, но високата им цена ограничава честото им използване – новите фантоми обикновено струват около 3 000–5 000 USD, докато на вторичния пазар (напр. eBay) могат да се намерят употребявани фантоми за приблизително 800–2000 USD, често без гаранция за състояние и проследимост [19]. По-специализирани фантоми като CDMAM могат да надхвърлят 10 000 USD, което допълнително ограничава достъпността им извън референтни центрове [17]. От друга страна, 3D-принтирането предоставя нови възможности за създаване на нискобюджетни и възпроизводими фантоми. Чрез тази технология могат да се създават обекти със сложна геометрия и контролирани физични свойства.

Основните предимства включват:

- ниска цена;
- бързо прототипиране;
- възможност за персонализация;
- възпроизводимост.

Въпреки това съществуват ограничения, свързани с:

- резолюцията на принтиране;
- рентгеновите свойства на материалите;
- необходимостта от експериментална валидация.

1.5 Цели и обосновка на настоящото изследване

Настоящата дипломна работа цели разработването на *нискобюджетен 3D-принтиран фантом за рутинен КК в мамографията (дневен или седмичен), който да допълва периодичните проверки*. Този фантом не цели да замени комерсиалните такива, използвани от външната фирма за КК, а да служи за проверка на постоянството в качеството на изображението и ранно откриване на отклонения в работата на системата в интервала между посещенията на външната фирма.

Стъпки за осъществяване на целта:

1. Разработване на нискобюджетен и възпроизводим 3D-принтиран фантом, както и прилежащият протокол за дневен/седмичен контрол на качеството, със следната последователност:

- CAD моделиране;
- избор на материали;
- 3D-принтиране.

2. Експериментална валидация на 3D-принтирания фантом, със следната последователност:

- клинични експозиции;
- анализ на качеството;
- оценка на възпроизводимостта.

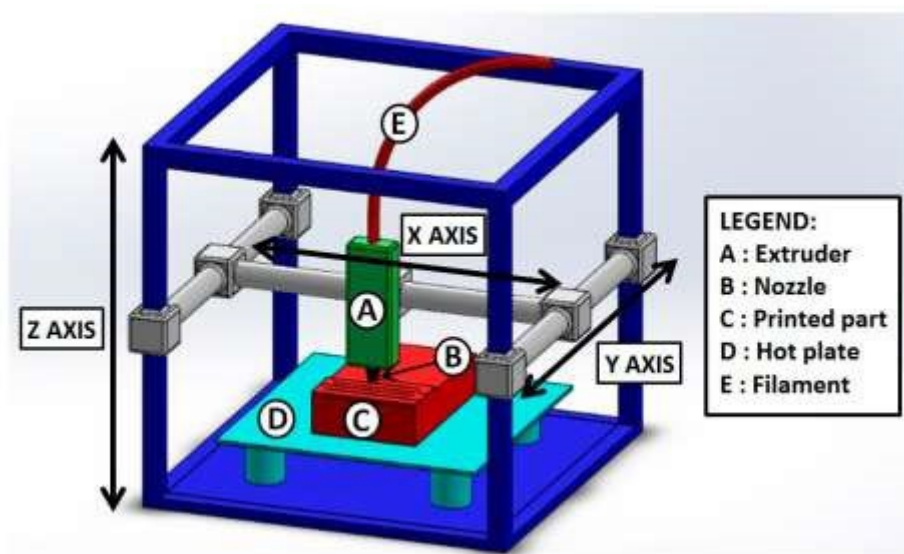
Проектът предлага практическо решение за внедряване на редовен КК и подобряване на диагностичната надеждност.

2 Материали и методи

2.1 3D-принтиране – описание на процеса на 3D-принтиране и използваните материали

Адитивното производство (Additive Manufacturing, AM), известно още като бързо прототипиране (Rapid Prototyping, RP), представлява съвкупност от технологии за триизмерен печат (3D Printing, 3DP), при които изделията се изграждат чрез последователно нанасяне на материал слой по слой. Този подход позволява изработването на детайли със сложна геометрия, малки размери и висока степен на персонализация. [20]

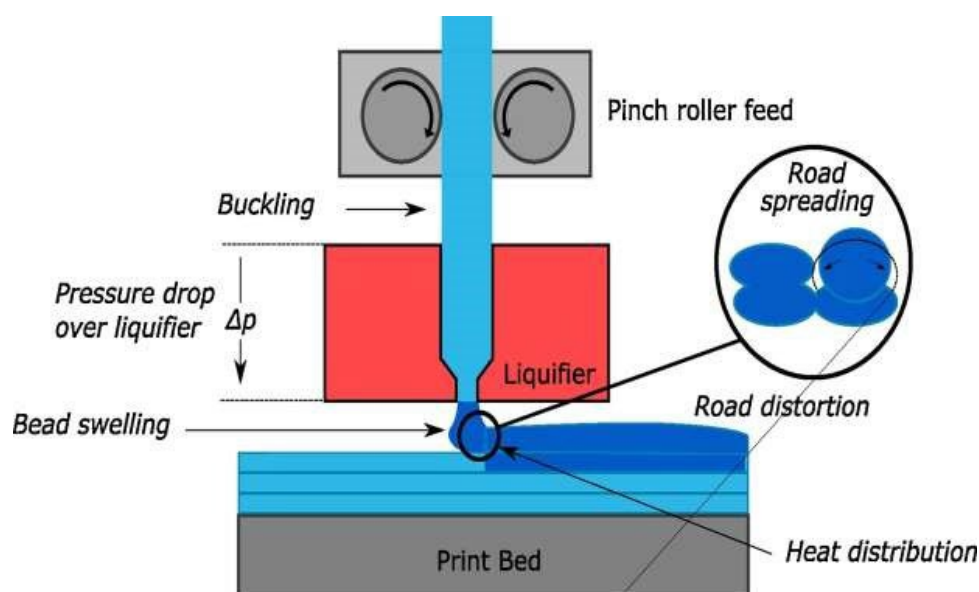
Сред различните технологии за адитивно производство най-широко приложение намира технологията Fused Deposition Modeling (FDM), известна още като Fused Filament Fabrication (FFF). **Фигура 1** представя принципната конструкция на FDM принтер и основните му функционални възли. Системата се състои от екструдер, който подава филамента към нагрятата печатаща глава, дюза за екструдирание на разтопения материал, работна платформа, върху която се изгражда детайлът, и механизъм за преместване по координатните оси X, Y и Z. [20] По време на печат филаментът се подава непрекъснато към екструдера, където се нагрява до температура над точката на топене, след което материалът се екструдира през дюзата и се отлага върху работната платформа по предварително зададена траектория.



Фигура 1. Схематична конструкция на FDM принтер с основните функционални елементи. **Източник:** Адаптирано по Daminabo et al. (2020) [20]

Чрез последователното наслагване на отделните слоеве постепенно се формира крайният триизмерен модел, съответстващ на предварително създаден цифров модел. [20]

Процесът се управлява от специализиран софтуер, който разделя CAD модела на множество хоризонтални слоеве и генерира необходимите инструкции за движение на принтера.



Фигура 2. Основни физични процеси при подаването, разтопяването и екструдирането на филамента по време на FDM принтиране. **Източник:** Адаптирано по Daminabo et al. (2020). [20]

Фигура 2 илюстрира основните физични процеси, протичащи по време на екструдирането на материала при 3D-принтирането. След подаването на филамента посредством задвижващите ролки той навлиза в нагревателната зона (liquifier), където постепенно се размеква и преминава във вискозно състояние. Под действието на налягането разтопеният материал се екструдира през дюзата и се отлага върху работната повърхност под формата на непрекъсната нишка (bead). [20]

Фигурата показва също някои от характерните явления, които оказват влияние върху качеството на отпечатаните детайли. Сред тях са локалното огъване на филамента (buckling), спадът на налягането в зоната на топене, разширяването на екструдираната нишка след напускане на дюзата (bead swelling), както и деформациите и разливането (road spreading) на материала по време на охлаждането. Контролът върху тези процеси е

от съществено значение за постигане на висока геометрична точност, добра адхезия между отделните слоеве и високо качество на крайния отпечатан детайл. [20]

Технологията FDM се характеризира с добра възпроизводимост, сравнително ниска цена на оборудването и материалите, както и възможност за производство на обекти със сложна геометрия. Типичната точност на отпечатаните детайли е от порядъка на 100 μm , като тя зависи от диаметъра на дюзата, височината на слоя и параметрите на печат. Благодарение на тези предимства FDM е една от най-разпространените технологии за изработване на медицински модели, персонализирани устройства и образни фантоми.

Ефективността на технологията FDM е тясно свързана със свойствата на използвания полимерен материал. Освен че трябва да осигурява добра технологичност по време на печат, материалът следва да притежава подходящи механични и физични характеристики. Поради това изборът на материал е ключов етап при разработването на медицински модели и образни фантоми. Сред най-често използваните термопластични материали за FDM принтиране е полилактидната киселина (PLA).

2.2 Избор и обосновка на материала за 3D-принтиране

Полилактидната киселина (Polylactic Acid, PLA) е биоразградим термопластичен полимер, получаван от възобновяеми суровини като царевично нишесте, захарна тръстика и други растителни източници. През последното десетилетие PLA се утвърждава като един от най-разпространените материали за триизмерен печат, особено при технологията Fused Deposition Modeling (FDM), поради съчетанието от добра обработваемост, ниска цена и лесна достъпност. [21]

За разлика от традиционните полимери, произведени от нефтопродукти, PLA предлага по-ниско въздействие върху околната среда и възможност за биологично разграждане при подходящи условия. Това води до нарастващ интерес към неговото приложение както в индустрията, така и в медицината и научните изследвания. PLA притежава редица свойства, които го правят подходящ за изработване на медицински модели и фантоми. Материалът се характеризира с добра размерна стабилност, ниско свиване при охлаждане и възможност за получаване на обекти с висока геометрична точност. [21] Освен това позволява лесно принтиране без необходимост от специализирано оборудване или сложна последваща обработка. В областта на медицинското 3D-принтиране PLA се използва за изработване на анатомични модели, хирургични шаблони и образни фантоми.

Поради комбинацията от ниска цена, добра възпроизводимост на геометрията, лесна обработка и подходящи физични свойства, PLA е избран като основен конструктивен материал за разработването на представения в настоящата работа 3D-принтиран мамографски фантом.

2.3 CAD 3D процес на моделиране на фантома

Преди физическата изработка на фантома е необходимо създаването на негов цифров триизмерен модел (**Фигура 3, Фигура 4**). Този етап позволява прецизно определяне на геометрията, размерите и разположението на отделните тест-обекти, както и предварителна оценка на възможностите за производство. В настоящото изследване 3D моделирането е извършено чрез CAD софтуера SolidWorks, който предоставя необходимите инструменти за проектиране на сложни геометрични структури с висока точност.

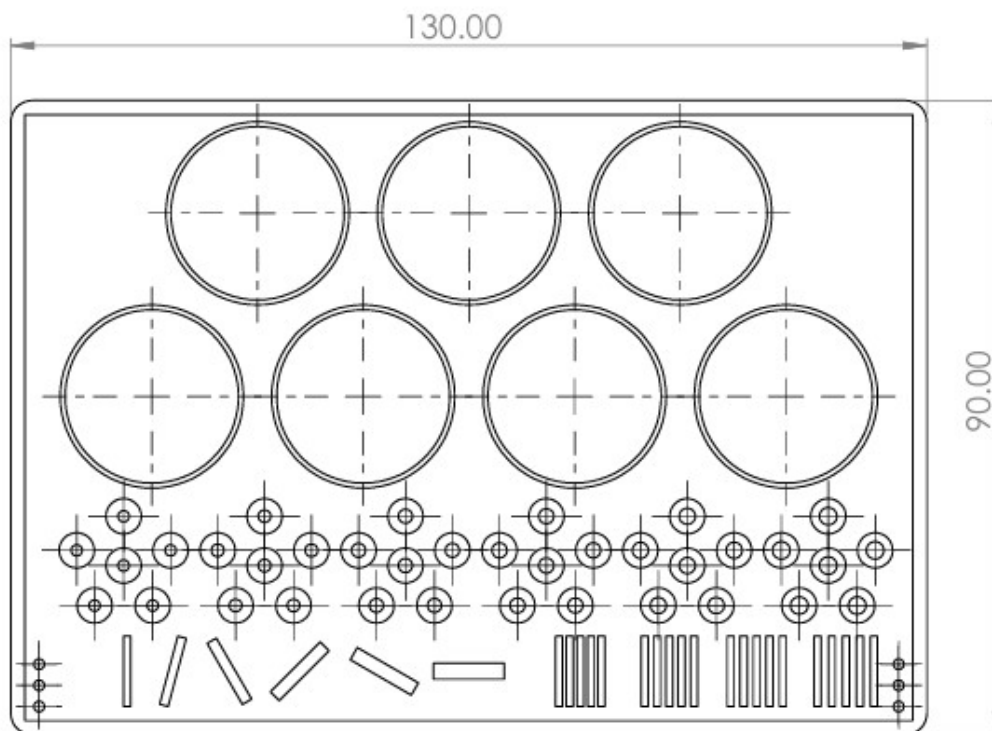
При разработването на фантома особено внимание е отделено на размерите и разположението на отделните тестови структури. Геометрията е съобразена както с изискванията на контрола на качеството в мамографията, така и с технологичните ограничения на използваната FDM технология. Размерите на най-малките елементи са подбрани така, че да могат да бъдат надеждно възпроизведени от използвания 3D принтер и същевременно да осигуряват необходимата чувствителност при оценка на качеството на образа.

Чрез използването на параметрично моделиране в SolidWorks е осигурена възможност за лесна промяна на размерите, формата и разположението на тест-обектите при бъдещи версии на фантома. Това позволява оптимизиране на дизайна в зависимост от конкретните цели на изследването или изискванията на използваната образна система.

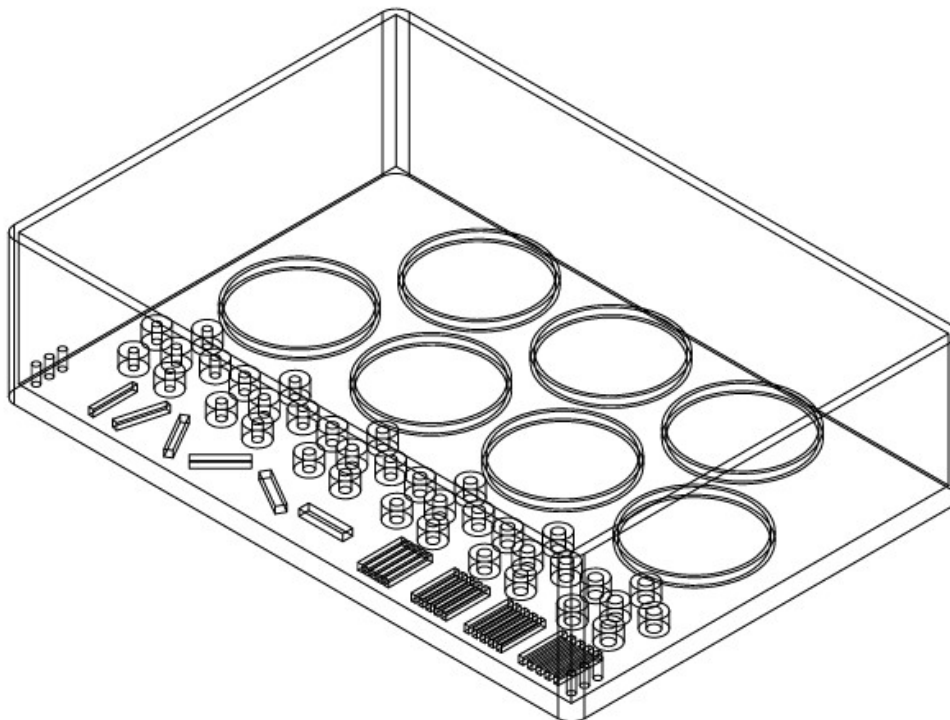
След създаването на цифровия модел е извършена проверка за геометрични несъответствия, пресичащи се повърхности и други дефекти, които биха могли да доведат до проблеми по време на принтирането. По този начин се гарантира коректното преобразуване на CAD модела в производствен файл и успешната изработка на крайния фантом.

След завършване на 3D модела той се експортира във формат STL (Standard Tessellation Language), който представлява стандартен файлов формат за адитивно производство и служи като входни данни за софтуера за подготовка на 3D печат.

STL файла ще бъде предоставен напълно безплатно в някои от платформите, даващи възможност за сваляне на 3D модели, предназначени за 3D-принтиране.



Фигура 3. CAD чертеж на фантома (изглед отгоре)



Фигура 4. CAD чертеж на фантома (изометричен изглед).

2.4 3D-принтиране и финална версия на фантома

3D-принтирания фантом (**Фигура 5**) представлява правоъгълна тестова плоча с размери 130×90 mm, проектирана за провеждане на различни тестове за контрол на качеството на мамографски системи. Конструкцията включва няколко функционални секции, предназначени за оценка на контрастната чувствителност, пространствената разделителна способност и способността на системата да визуализира малки висококонтрастни структури.

В горната част на фантома са разположени три цилиндрични контейнера, предназначени за изследване на влиянието на различни концентрации на калциев карбонат върху образния контраст. Контейнерите са запълнени със смеси от парафин и калциев карбонат, съдържащи съответно 25%, 50% и 75% CaCO_3 .

Парафинът е избран като материал с рентгенови характеристики, близки до тези на мастната тъкан, докато калциевият карбонат служи като модел на калцирани структури. Чрез използването на различни концентрации се създава градиент на рентгеново отслабване, който позволява оценка на контрастната чувствителност на мамографската система.

Под тях е разположена втора група от четири цилиндрични контейнера, съдържащи различни вещества: вода, растително олио, калциев карбонат и чист парафин.

- Вода - референтен материал за меки тъкани;
- Олио - мастноподобен материал с ниска плътност;
- CaCO_3 - симулация на микрокалцификати;
- Парафин - аналог на мастна тъкан

Тази секция е предназначена за сравнение на образните характеристики на материали с различна плътност и ефективен атомен номер. Получените изображения позволяват визуална оценка на способността на системата да различава материали с различни рентгенови свойства. В **Таблица 1** са представени основните физични характеристики за отделните материали, тяхната плътност, ефективен атомен номер и предназначение.

В централната част на фантома са разположени групи от цилиндрични отвори с различни диаметри, организирани в отделни тестови секции. Отворите са предназначени за запълване с калциев карбонат и симулират микрокалцификати с различни размери.

Тази зона позволява определяне на минималния размер на калцифицирана структура, която може да бъде надеждно визуализирана, като по този начин служи за оценка на пространствената разделителна способност и контрастната чувствителност на системата.

В долната лява част на фантома са разположени линейни тест-обекти с различна ориентация. Те позволяват оценка на способността на образната система да визуализира структури под различни ъгли и могат да бъдат използвани за откриване на анизотропия в качеството на изображението.

В долната дясна част са разположени групи от успоредни правоъгълни елементи с постепенно намаляващо разстояние между тях. Тези тестови структури са предназначени за оценка на пространствената разделителна способност на мамографската система. Чрез определяне на най-фината група линии, която остава ясно различима в изображението, може да се направи качествена оценка на способността на системата да възпроизвежда малки детайли.

Комбинирането на различни тестови обекти и материали в един общ фантом позволява едновременно извършване на няколко теста за контрол на качеството в рамките на една експозиция. Това улеснява рутинното приложение на фантома при седмичен контрол на качеството и същевременно създава възможност за сравнение на резултатите при различни експозиционни параметри и образни системи.



Фигура 5. Реална снимка на 3D-принтирания фантом

Материал	Плътност (g/cm ³)	Ефективен атомен номер (Zeff)	Основно предназначение
PLA	1.20 – 1.25	≈ 5.8–6.5	Корпус на фантома
Парафин	0.88 – 0.93	≈ 5.4–5.7	Симулация на мастна тъкан
Растително олио	0.91 – 0.93	≈ 5.5–5.8	Мастноподобна среда
Вода	1.00	≈ 7.4	Референтна стойност
Калциев карбонат (CaCO ₃)	2.7 – 2.9	≈ 15–16	Симулация на микрокалцификати

Таблица 1. Основни физични характеристики на използваните материали

2.5 Производствен процес и параметри на принтиране

Разработеният в настоящото изследване мамографски фантом е изработен посредством 3D принтер **Bambu Lab P2S** (Фигура 6).



Фигура 6. Изображение на 3D принтер *Bambu Lab P2S*.

Основните технически характеристики на използвания 3D принтер Bambu Lab P2S са:

- Технология на печат: Fused Deposition Modeling (FDM);
- Работен обем: $256 \times 256 \times 256 \text{ mm}^3$;
- Диаметър на използвания филамент: 1.75 mm;
- Стандартен диаметър на дюзата: 0.4 mm;
- Поддържани диаметри на дюзите: 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm и 0.8 mm;
- Максимална температура на дюзата: 300 °C;
- Максимална температура на нагреваемата платформа: 110 °C;
- Затворена работна камера за поддържане на стабилни температурни условия;
- Закалена стоманена дюза, осигуряваща висока изнosoустойчивост;
- Автоматично калибриране и нивелиране на работната платформа;
- Поддръжка на различни термопластични материали, включително PLA, PETG, ABS и инженерни полимери [22].

Използван материал в настоящото изследване: PLA филамент с диаметър 1.75 mm

Резолюция на отделните слоеве: 100 микрона.

2.6 Състав и провеждане на контрол на качеството с 3D-принтираният фантом

Фигура 7 показва финализираната версия на фантома, снимана на мамографска уредба, където:

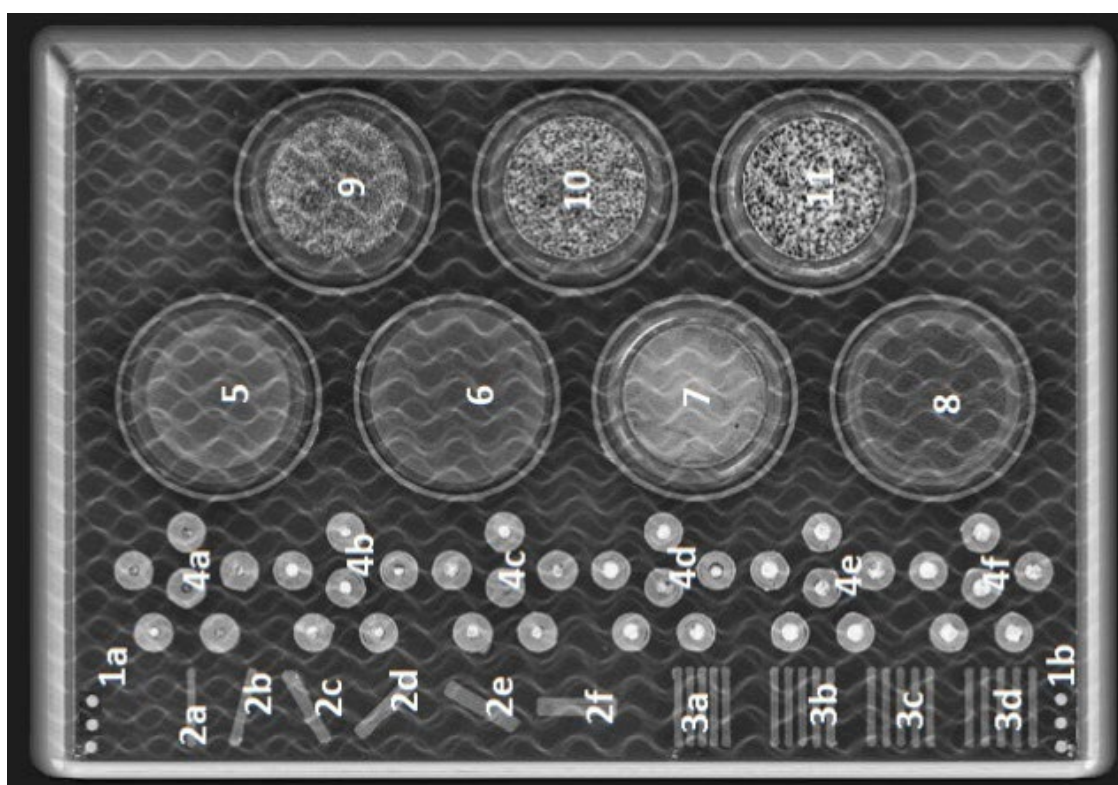
№	Обект	Предназначение
1a	Маркери за горна граница на полето	Проверка на правилното позициониране на фантома, колимацията и възпроизводимостта на изображенията.
1b	Маркери за долна граница на полето	
2a	Линейна вложка – най-тънка	Представява най-малкия линеен тестов обект и определя прага на визуализация на фини линейни структури.
2b	Линейна вложка – много тънка	Използва се за оценка на възпроизвеждането на много фини линейни детайли.
2c	Линейна вложка – тънка	Проверява способността на системата да визуализира линейни структури с малка ширина.
2d	Линейна вложка – дебела	Служи като междинен референтен обект за сравнение с по-тънките линейни вложки.
2e	Линейна вложка – много дебела	Използва се за контрол на контрастното възпроизвеждане при по-широки линейни структури.
2f	Линейна вложка – най-дебела	Представява най-лесно различимия линеен тестов обект и служи като референтен елемент при визуалната оценка на останалите линейни вложки.

№	Обект	Предназначение
3a	Решетка за пространствена разделителна способност – ниска честота	Проверка на възпроизвеждането на едри детайли.
3b	Решетка за пространствена разделителна способност – средна честота	Оценка на пространствената разделителна способност при междинни честоти.
3c	Решетка за пространствена разделителна способност – висока честота	Проверка на възпроизвеждането на фини детайли.
3d	Решетка за пространствена разделителна способност – максимална честота	Определяне на пределната разделителна способност на системата и евентуална деградация на фокусното петно или детектора.
4a	Група микрокалцификати – най-малък размер	Представява най-трудната тестова структура и определя диагностичния праг на системата.
4b	Група микрокалцификати – много малък размер	Използва се за ранно откриване на влошаване на качеството на изображението.
4c	Група микрокалцификати – малък размер	Проверка на визуализацията на трудно различими микрокалцификати.
4d	Група микрокалцификати – среден размер	Оценка на контрастната чувствителност при малки калцификати.
4e	Група микрокалцификати – средно голям размер	Проверява възможността за визуализиране на по-дребни калцификати.

№	Обект	Предназначение
4f	Група микрокалцификати – голям размер	Симулира лесно различими микрокалцификати и служи като референтен тест.
5	Капсула – вода	Представява референтна вложка с ниска рентгенова атенюация, използвана за оценка на контрастното възпроизвеждане и стабилността на изображението при материал с плътност, близка до тази на меките тъкани.
6	Капсула – олио за готвене	Симулира мастна тъкан и се използва за оценка на способността на системата да различава материали с ниска ефективна атомна маса и нисък коефициент на затихване.
7	Капсула – калциев карбонат	Симулира силно рентгенопоглъщащ материал, аналогичен на калцификатите в млечната жлеза, и служи за проверка на контрастната чувствителност при висококонтрастни структури.
8	Капсула – 100% парафин	Представява хомогенна вложка с атенюационни характеристики, близки до мастната компонента на млечната жлеза, използвана като референтен материал при оценка на контраста.
9	Капсула – 75% парафин/25% калциев карбонат	Симулира материал с умерено повишена рентгенова атенюация и се използва за оценка на способността на системата да различава малки промени в плътността на обектите.

№	Обект	Предназначение
10	Капсула – 50% парафин/50% калциев карбонат	Представява вложка със средна рентгенова атенюация и позволява оценка на линейността на контрастното възпроизвеждане при междинни стойности на поглъщане.
11	Капсула – 25% парафин/75% калциев карбонат	Представява вложка с висока рентгенова атенюация, използвана за проверка на способността на мамографската система да възпроизвежда обекти с висок контраст и за оценка на динамичния диапазон на изображението.

Таблица 2. Описание на обектите, разположени във фантома и тяхното предназначение



Фигура 7. Рентгеново изображение на фантома, заснето с мамограф

2.6.1 Тест 1. Проверка на позиционирането и колимацията (Фигура 7, Обекти 1a–1b)

След получаване на изображението се проверява дали горните и долните позициониращи маркери са напълно визуализирани и разположени симетрично спрямо границите на изображението. Оценява се правилното центриране на фантома, съвпадението между експонираното поле и активната област на детектора, както и отсъствието на изрязване на който и да е от маркерите. Полученото изображение се сравнява с референтното изображение, като се проверява възпроизводимостта на позиционирането при последователни измервания.

Критерии за приемане на резултати:

- всички маркери са напълно видими;
- липсва изрязване на изображението;
- фантомът е правилно центриран;
- не се наблюдава промяна в положението спрямо референтното изображение.

2.6.2 Тест 2. Проверка на визуализацията на линейни вложки (Обекти 2a–2f)

Оценката започва от най-тънката линейна вложка (2a) и продължава последователно към най-дебелата (2f). За всяка вложка се определя дали е ясно различима по цялата си дължина от околния фон. Записва се най-тънката линейна вложка, която може да бъде визуализирана без прекъсвания или значително намаляване на контраста. Получените резултати се сравняват с базовото изображение и с резултатите от предходните седмични проверки.

Критерии за приемане на резултати:

- всички линейни вложки, визуализирани при базовото измерване, остават видими;
- не се наблюдава намаляване на броя на ясно различимите вложки;
- липсват размазване, деформация или локална загуба на контраст.

2.6.3 Тест 3. Проверка на пространствената разделителна способност (Фигура 7, Обекти 3a–3d)

Визуално се оценяват четирите решетки за пространствена разделителна способност, като се започва от най-ниската пространствена честота (3a) и се преминава към най-високата (3d). За всяка решетка се проверява дали отделните линии могат ясно да бъдат разграничени една от друга без сливане. Отбелязва се решетката с най-висока пространствена честота, при която линиите все още са отчетливо различни. Получените резултати се сравняват с референтното изображение.

Критерии за приемане на резултати:

- отчетливо разграничаване на линиите в решетките;
- липса на сливане или загуба на детайл;
- отсъствие на влошаване спрямо базовото изображение.

2.6.4 Тест 4. Проверка на визуализацията на микрокалцификати (Фигура 7, Обекти 4a–4f)

Групите микрокалцификати се оценяват последователно, започвайки от най-малките (4a) към най-големите (4f). За всяка група се определя дали отделните микрокалцификати могат да бъдат ясно разграничени и преброени. Записва се най-малката група, която остава надеждно видима при текущото изображение. Резултатите се сравняват с базовото изображение и с предходните седмични проверки с цел откриване на евентуално намаляване на контрастната чувствителност на системата.

Критерии за приемане на резултати:

- всички микрокалцификатни групи, наблюдавани при базовото измерване, остават видими;
- не се наблюдава намаляване на броя на визуализираните групи;
- липсват артефакти, които могат да имитират или да прикриват микрокалцификати.

2.6.5 Тест 5. Оценка на хомогенните материали (Фигура 7, Обекти 5-8)

След получаване на изображението във всяка от капсулите (Обекти 5–8) се определя кръгла област на интерес (ROI), разположена в централната част на материала, като се избягват периферните участъци с цел минимизиране влиянието на частичния

обмен ефект. За всяка област на интерес се определят средната стойност на пикселите (Mean), медианата (Median), стандартното отклонение (SD), минималната (Minimum) и максималната (Maximum) стойност на пикселите. Получените резултати се сравняват с референтните стойности от базовото измерване и с резултатите от предходните периодични проверки. Оценява се стабилността на измерените параметри и възпроизводимостта на изображенията при еднакви експозиционни условия.

Критерии за приемане на резултати:

- стойностите на Mean и Median не показват съществено отклонение спрямо базовото измерване;
- стойността на SD остава в предварително определения допустим диапазон;
- стойностите Minimum и Maximum не показват необичайни изменения спрямо референтните резултати;
- не се наблюдават артефакти или нееднородности в областта на интерес;
- резултатите са възпроизводими при последователни измервания, извършени при еднакви експозиционни условия.

2.6.6 Тест 6. Оценка на композитните материали (Фигура 7, Обекти 9-11)

След получаване на изображението за всяка от композитните капсули (Обекти 9–11) се определя кръгла област на интерес (ROI), разположена в централната част на материала. За всяка област на интерес се определят средната стойност на пикселите (Mean), медианата (Median), стандартното отклонение (SD), минималната (Minimum) и максималната (Maximum) стойност на пикселите. Получените резултати се сравняват с референтните стойности от базовото измерване и с резултатите от предходните проверки. Анализира се запазването на очакваните различия между отделните композитни материали, както и стабилността на измерените пикселни стойности във времето.

Критерии за приемане на резултати:

- стойностите на Mean и Median за трите композитни материала остават в допустимите граници спрямо базовото измерване;
- стойността на SD не показва увеличение, което би могло да бъде свързано с повишен шум или нестабилност на системата;

- стойностите Minimum и Maximum остават в границите на очакваните вариации;
- запазва се последователността в измерените пикселни стойности между трите материала, съответстваща на различното съдържание на калциев карбонат;
- не се наблюдават локални артефакти, нехомогенности или други изменения, които биха повлияли количествения анализ.

2.7 Клинично тестване на 3D-принтираният фантом в лечебни заведения и Методика за анализ на изображенията

Фантомът беше сниман на клинична мамографска уредба при условия, максимално близки до рутинната клинична практика и в едно болнично заведение, на една мамографска уредба. Преди всяка експозиция фантомът се поставяше върху детектора на мамографската система, като задният му ръб се подравняваше с гръдната страна на детектора по аналогия с позиционирането на стандартните акредитационни фантоми. Особено внимание беше обърнато на възпроизводимото позициониране, тъй като дори малки разлики в положението могат да повлияят на визуализацията на най-малките тест-обекти. След позициониране компресионната плоча се спускаше внимателно до контакт с повърхността на фантома, без прилагане на значителна компресионна сила, с цел осигуряване на стабилно положение по време на експозицията и елиминиране на възможността за движение. За всички измервания се използваха клинични режими на работа, предназначени за образна диагностика на гърда със средна дебелина и плътност, като при възможност беше използван автоматичният контрол на експонацията (АЕС). След подготовката на системата се извършваше експозиция на фантома и полученото изображение се съхраняваше в DICOM формат за последващ анализ. Анализът беше извършен с MicroDicom софтуер. **Таблица 3** показва клинично очаквани резултати. Важно е да се отбележи, че тези очаквани резултати са валидни конкретно за тази мамографска уредба. В случаите в които се използва друга уредба очакваните резултати може да се различават. Ето защо е важно веднага след като е извършен периодичен (годишен/полугодишен) контрол на качеството и уредбата е в максимално добро техническо състояние, фантома да се сканира и да се определят очакваните стойности. След това тези стойности да се проверяват за отклонение периодично – всеки ден и веднъж седмично.

Капсула – вода	Mean:	1674.01
	Median:	1634
	SD:	166.64
	Min:	1292
	Max:	2454
Капсула – олио за готвене	Mean:	1537.59
	Median:	1498
	SD:	154.74
	Min:	1202
	Max:	2215
Капсула – калциев карбонат	Mean:	2236.54
	Median:	2220
	SD:	162.87
	Min:	1697
	Max:	2917
Капсула – 100% парафин	Mean:	1490.71
	Median:	1457
	SD:	173.41
	Min:	1045
	Max:	2258
	Mean:	1783.6

Капсула – 75% парафин/25% калциев карбонат	Median:	1763
	SD:	318.36
	Min:	902
	Max:	3302
Капсула – 50% парафин/50% калциев карбонат	Mean:	1959.65
	Median:	1949
	SD:	516.7
	Min:	249
	Max:	3552
Капсула – 25% парафин/75% калциев карбонат	Mean:	2130.47
	Median:	2174
	SD:	635.8
	Min:	0
	Max:	3722

Таблица 3. Клинично очаквани стойности при провеждане на КК на маммографско сканиране с типични стойности: 40mAs и 26kV.

2.8 Провеждане на КК и оценка на възпроизводимостта

За всяка експозиция се оценяваше броят на ясно различимите тест-обекти, наличието на артефакти, контрастът между отделните структури и фона, както и способността за разграничаване на най-фините линейни елементи. Резултатите се въвеждаха в табличен вид. При необходимост изображенията бяха увеличавани чрез стандартните инструменти на софтуера за визуализация с цел по-прецизна оценка на дребните детайли. За оценка на възпроизводимостта процедурата беше повторена многократно при идентични условия и различни дни, като резултатите от отделните

експозиции бяха сравнени с цел установяване на стабилността на фантома и неговата чувствителност към евентуални промени в работата на мамографската система. Този подход позволява разработеният 3D-принтиран фантом да бъде използван като средство за рутинен дневен или седмичен контрол на качеството между периодичните проверки, типично извършавани от външен за болничното заведение медицински физик.

2.9 Тест за регистриране на клинично значими отклонения

За оценка на чувствителността на разработения 3D-принтиран фантом към клинично значими отклонения в работата на мамографската система беше разработен специален тест (**Таблица 4**), при който умишлено се въвеждат контролирани промени в протокола на експозиция. Целта на този тест е да се провери дали фантомът може да регистрира влошаване на качеството на изображението, което в реална клинична ситуация би могло да доведе до намалена детектируемост на малки структури, микрокалцификати, нискоконтрастни обекти или фини линейни детайли. Първоначално се извършва базово сканиране на фантома при стандартен клиничен мамографски протокол, използван за гърда със средна дебелина и плътност. Полученото изображение се приема като референтно и се използва за сравнение с последващите изображения, като се отчита дали въведената промяна води до ясно регистрирано влошаване на качеството, и получени след въвеждане на контролирани грешки:

mAs	kV	коментар	потенциален клиничен ефект
40	26	стандартен клиничен протокол за мамографии	Референтно изображение – очаквано оптимално съотношение между качество на изображението и доза.
40	28	увеличени kV, mAs без промяна	Намален контраст на меките тъкани и микрокалцификатите; възможно пропускане на малки лезии при по-висока доза.
40	30		
40	24		

mAs	kV	коментар	потенциален клиничен ефект
40	22	намалени kV, mAs без промяна	Повишен контраст, но недостатъчно проникване в плътни гърди, квантов шум и риск от недиагностични изображения.
36	26	намалени mAs, kV без промяна	Повишен квантов шум и понижена видимост на нискоконтрастни структури; риск от пропускане на микрокалцификати.
32	26		
45	26	увеличени mAs, kV без промяна	Подобрено SNR, но ненужно повишена средна жлезиста доза без съществено подобрене на диагностиката.
50	26		
50	24	увеличени mAs, намалени kV	Много висок контраст и доза; възможно насищане на изображението и ограничена оценка на плътни структури.
50	22		
50	28	увеличени mAs, увеличени kV	Намален контраст поради висок kV и повишена доза; възможно прикриване на малки лезии.
50	30		
28	24	намалени mAs, намалени kV	Недостатъчна експозиция и проникване; силен шум и вероятност за повторно изследване.
28	22		
28	28		

mAs	kV	коментар	потенциален клиничен ефект
28	30	намалени mAs, увеличени kV	Компромис между шум и контраст; възможно намалена видимост на фините детайли.

Таблица 4. Клинично значими грешки, въведени по време на експерименталното тестване на 3D-принтирания фантом и очакваното им влияние върху качеството на мамографското изображение.

2.10 Шаблон на използваните протоколи за КК

С цел улесняване на практическото приложение на разработения мамографски QA фантом беше създаден стандартизиран протокол (**Таблица 5**) за извършване на седмичен контрол на качеството. Протоколът включва идентификационни данни за изследваната система, използваните експозиционни параметри, методиката за оценка на всички тестови обекти на фантома, критериите за приемане, както и поле за документиране на получените резултати и крайното заключение за техническото състояние на мамографската система. По този начин се осигурява унифициран подход при извършването на контрола на качеството, проследяване на резултатите във времето и своевременно установяване на отклонения в работата на системата.

Разработеният протокол е съобразен с конструкцията на фантома и обединява както визуалните тестове за оценка на качеството на изображението, така и количествен анализ на пикселните стойности в отделните материални вложки, което позволява обективно проследяване на стабилността на мамографската система при периодичния контрол на качеството.

Идентификация на клиента	Аджибадем Сити Клиник УМБАЛ Токуда
Адрес	„Никола Й. Вапцаров“ 51Б, 1407 София
Обект на контрол: Марка и Модел	GE Senograph Pristina

Обект на контрол: Сериен Номер		2598764D		
Място на обекта за контрол:		Зала за мамографски изследвания		
Провел КК		медицински физик ГГ		
Използван фантом		мамографски фантом за седмичен КК		
Комбинация Мишена/Детектор		Mo-Mo		
Използвани mAs/kV		40/26		
Дата на КК		18/03/2025		
Забележки		Няма		
Заклучение		апарата е в изправност	апарата има нужда от профилактика \ ремонт	апарата не е годен за клинична употреба
Обект		Методика за QA тест	Критерий за приемане (Pass/Fail)	Резултат
1a	Маркери за горна граница на полето	Проверява се правилното положение на маркерите и съвпадението им с границите на полето.	Всички маркери са ясно видими и без изместване.	Всички маркери са отличими и без изместване.
1b	Маркери за долна граница на полето			

2a	Линейна вложка – най-тънка	Оценява се видимостта на линейната вложка и се сравнява с референтното изображение.	Структурата е ясно различима без загуба на контраст.	Всички структури са отличими и без загуба на контраст.
2b	Линейна вложка – много тънка			
2c	Линейна вложка – тънка			
2d	Линейна вложка – дебела			
2e	Линейна вложка – много дебела			
2f	Линейна вложка – най-дебела			
3a	Решетка за пространствена разделителна способност – ниска честота	Определя се най-фината различима решетка.	Достига се референтната пространствена разделителна способност.	Всички елементи на решетката са ясно различими
3b	Решетка за пространствена разделителна способност – средна честота			
3c	Решетка за пространствена разделителна способност – висока честота			

3d	Решетка за пространствена разделителна способност – максимална честота			
4a	Група микрокалцификати – най-малък размер	Оценява се видимостта на групата микрокалцификати.	Групата е ясно видима и съответства на референтното изображение.	Всички елементи в група са ясно видими и отличими
4b	Група микрокалцификати – много малък размер			
4c	Група микрокалцификати – малък размер			
4d	Група микрокалцификати – среден размер			
4e	Група микрокалцификати – средно голям размер			
4f	Група микрокалцификати – голям размер			

5	Капсула – вода	Записват се Max, Median, SD, Min, Max стойности на ROI с площ 100мм2	Допустима промяна от очакваните стойности: 10% (Граница на безопасна работа) и 5% (Граница на нормална работа)	Mean:	1674.01
				Median:	1634
				SD:	166.64
				Min:	1292
				Max:	2454
6	Капсула – олио за готвене			Mean:	1537.59
				Median:	1498
				SD:	154.74
				Min:	1202
				Max:	2215
7	Капсула – калциев карбонат			Mean:	2236.54
				Median:	2220
				SD:	162.87
				Min:	1697
				Max:	2917
8	Капсула – 100% парафин			Mean:	1490.71
				Median:	1457
				SD:	173.41
				Min:	1045
				Max:	2258

9	Капсула – 75% парафин/25% калциев карбонат			Mean:	1783.6
				Median:	1763
				SD:	318.36
				Min:	902
				Max:	3302
10	Капсула – 50% парафин/50% калциев карбонат			Mean:	1959.65
				Median:	1949
				SD:	516.7
				Min:	249
				Max:	3552
11	Капсула – 25% парафин/75% калциев карбонат			Mean:	2130.47
				Median:	2174
				SD:	635.8
				Min:	0
				Max:	3722

Таблица 5. *Шаблон на протокол за контрол на качеството, разработен за приложение на принтирания фантом*

2.11 Ограничения на метода и бъдещо развитие

Едно от основните ограничения е свързано с използваната технология за производство – Fused Deposition Modeling (FDM). При този метод обектът се изгражда чрез последователно наслагване на слоеве от разтопен полимер, което води до ограничена пространствена разделителна способност в сравнение с индустриалните производствени технологии. Размерът на най-малките детайли се определя основно от диаметъра на дюзата и височината на слоя. При използваната дюза с диаметър 0.4 mm

съществува практическо ограничение при изработването на много малки структури, характерни за реалните микрокалцификати, наблюдавани при мамографията.

Друго ограничение е, че на този етап анализа на КК се извършва ръчно от физик или лаборант, което е времеотнемащо и внася елемент на субективност.

Разработения 3D-принтиран фантом не цели да замени напълно комерсиалните решения, а да предостави достъпна алтернатива за рутинен седмичен контрол на качеството и обучителни дейности. Ниската цена на производство и възможността за бързо отпечатване на нови екземпляри създават предпоставки за по-широко внедряване на регулярни QA процедури в лечебните заведения.

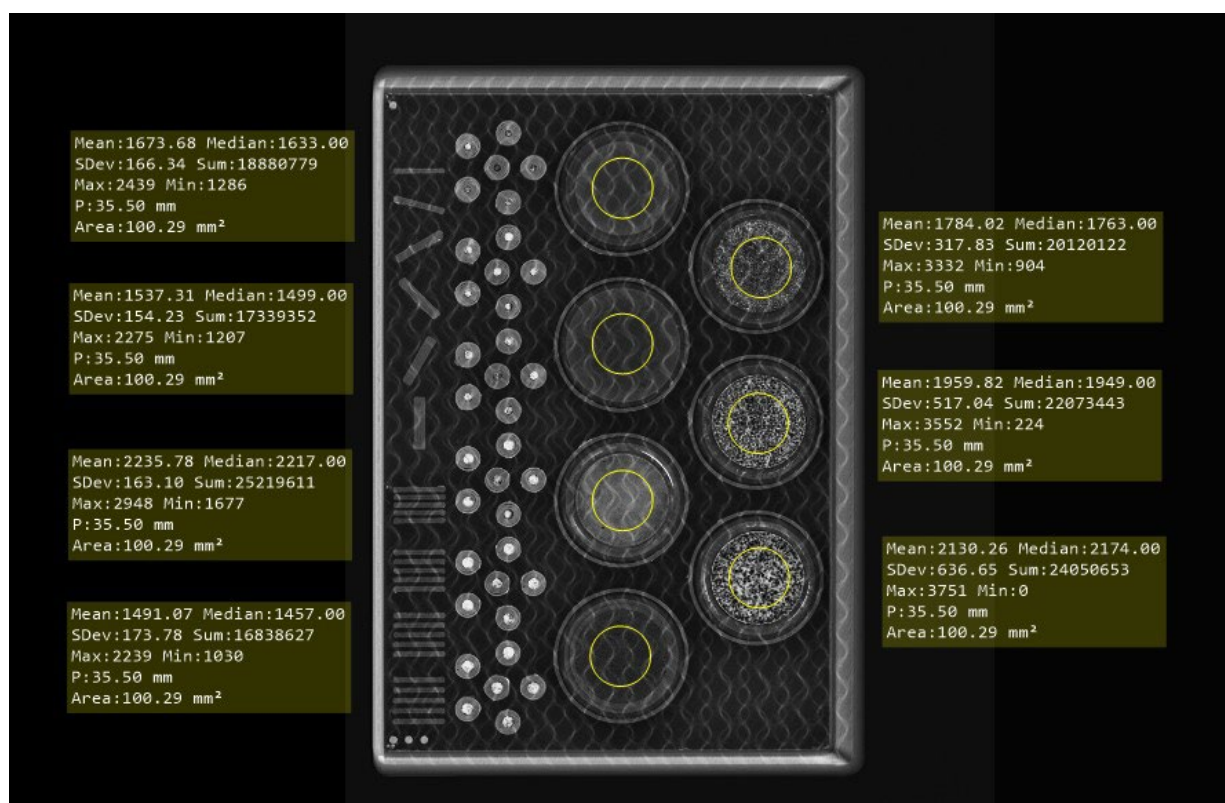
Бъдещото развитие на фантома ще бъде насочено към:

- използване на по-високорезолуционни технологии за адитивно производство, като SLA или DLP принтиране, които позволяват реализиране на значително по-малки тестови структури.
- разработването на софтуер за автоматичен анализ на изображенията, който да позволява обективна оценка на резултатите и натрупване на статистически данни за дългосрочно проследяване на работата на мамографските системи.

Независимо от ограниченията си, разработеният фантом покрива основната цел на проекта – предоставяне на нискобюджетен инструмент за дневен или седмичен контрол на качеството.

3 Резултати

Фигура 8 илюстрира процеса на количествен анализ, който се извършва в софтуера MicroDicom. Върху изображението е дефинирана област на интерес (ROI), от която се отчитат статистическите показатели Mean, Median, Standard Deviation (SD), Minimum и Maximum. Тези стойности са използвани по-нататък при анализа и изготвянето на графиките за отделните материали. Процедурата е приложена по идентичен начин за всички материални капсули и всички използвани експозиционни протоколи, което осигурява сравнимост на получените резултати



Фигура 8. Изображение от програмата MicroDicom, след заснемане на фантома на уредба за мамография, със стойностите, които отчитаме за Mean, Median, Minimum, Maximum и SD

3.1 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 40mAs/26kV (клиничен протокол, четири сканирания)

За определяне на референтните стойности на разработения 3D-принтиран мамографски фантом бяха извършени четири последователни заснемания при стандартен клиничен протокол с параметри 26 kV и 40 mAs на мамографска система GE Senograph Pristina. И при четирите измервания е използвана една и съща геометрия на позициониране и идентични условия на експозиция. Резултати от тези измервания се намират на **Таблица 1.1-1.4** ([Appendix](#)).

При визуалната оценка всички качествени тестови обекти са отчетени като ясно различни. Маркерите, обозначаващи границите на облъчваното поле, са били правилно визуализирани без наличие на изместване. Всички линейни вложки са отчетени с добра контрастна видимост, без загуба на детайли. Решетките за оценка на пространствената разделителна способност са ясно различни във всички честотни диапазони, а всички групи микрокалцификати са успешно визуализирани и съответстват на референтното изображение. В резултат на това системата покрива всички предварително зададени критерии за приемане при качествения контрол.

Количествената оценка беше извършена чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в кръгова област на интерес (ROI) с площ 100 mm² за всяка от седемте материални капсули. Получените резултати показват много добра възпроизводимост между четирите последователни измервания.

Средните стойности за отделните материали са както следва: вода – приблизително 1674, олио – 1537, 100% парафин – 1491, калциев карбонат – 2236, смес 75% парафин / 25% калциев карбонат – 1784, смес 50% парафин / 50% калциев карбонат – 1960, и смес 25% парафин / 75% калциев карбонат – 2130. Разликите между четирите независими измервания за всяка капсула са минимални и се ограничават до части от единица, което показва висока повтораемост на измерванията.

Стандартното отклонение също остава практически непроменено при всички повторения за всеки материал. Най-ниски стойности са отчетени при олиото и водата, докато по-високи стойности се наблюдават при смесите с по-голямо съдържание на калциев карбонат, като най-високо SD е измерено при капсулата със съотношение 25%

парафин / 75% калциев карбонат. Минималните и максималните стойности също демонстрират добра възпроизводимост между отделните експозиции.

В заключение, при използване на стандартния клиничен протокол (26 kV, 40 mAs) разработеният фантом осигурява стабилни и добре възпроизводими качествени и количествени резултати. Получените стойности могат да бъдат използвани като референтна база за последващи сравнения при ежедневен или седмичен контрол на качеството на мамографската система.

3.2 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 40mAs/28kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.5 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 28 kV и 40 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs).

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, групите за оценка на пространствената разделителна способност и всички микрокалцификати се наблюдават ясно и са отчетени при извършената визуална оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 1374.78 и SD 159.90, за олиото – Mean 1243.75 и SD 148.92, за 100% парафин – Mean 1199.49 и SD 166.75, за калциевия карбонат – Mean 1909.37 и SD 154.10. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1482.07 (75% парафин / 25% CaCO₃), 1655.60 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 1814.31 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 304.02, 493.11 и 662.54. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности са по-ниски за всяка от седемте материални вложки, докато измерените стойности на стандартното отклонение, минималните и максималните пикселни стойности също се различават от референтните резултати в различна степен. Всички измерени параметри са документирани и използвани за последващо сравнение с останалите експериментални серии.

3.3 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 40mAs/30kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.6 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 30 kV и 40 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs).

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 1118.68 и SD 153.90, за олиото – Mean 992.59 и SD 143.18, за 100% парафин – Mean 949.62 и SD 160.72, а за калциевия карбонат – Mean 1627.23 и SD 146.47. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1222.94 (75% парафин / 25% CaCO₃), 1395.05 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 1542.34 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 291.92, 470.29 и 569.75. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности са по-ниски за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.4 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 40mAs/24kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.7 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 24 kV и 40 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs).

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 2044.05 и SD 173.85, за олиото – Mean 1900.18 и SD 162.57, за 100% парафин – Mean 1854.25 и SD 181.59, а за калциевия карбонат – Mean 2631.07 и SD 178.96. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 2151.24 (75% парафин / 25% CaCO₃), 2327.96 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 2512.29 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 333.60, 543.26 и 669.45. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности са по-високи за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.5 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 40mAs/22kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.8 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 22 kV и 40 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs).

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 2509.27 и SD 186.12, за олиото – Mean 2356.21 и SD 174.39, за 100% парафин – Mean 2307.40 и SD 193.06, а за калциевия карбонат – Mean 3126.45 и SD 167.79. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 2617.06 (75% парафин / 25% CaCO₃), 2796.08 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 2991.83 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 353.61, 571.70 и 693.39. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и

медианните стойности са по-високи за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.6 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 26mAs/36kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.9 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 26 kV и 36 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като единствената променена експозиционна величина е стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различни и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 1763.23 и SD 165.99, за олиото – Mean 1626.10 и SD 155.24, за 100% парафин – Mean 1580.22 и SD 173.71, а за калциевия карбонат – Mean 2324.84 и SD 163.74. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1872.94 (75% парафин / 25% CaCO₃), 2048.54 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 2218.91 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 317.98, 517.79 и 636.73. Прямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.7 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 32mAs/26kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.10 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 26 kV и 32 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като единствената променена експозиционна величина е стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 1860.76 и SD 167.23, за олиото – Mean 1723.23 и SD 155.88, за 100% парафин – Mean 1676.86 и SD 173.16, а за калциевия карбонат – Mean 2422.91 и SD 163.45. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1969.57 (75% парафин / 25% CaCO₃), 2145.33 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 2316.66 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 318.38, 517.87 и 637.42. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.8 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 45mAs/26kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.11 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 26 kV и 45 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като единствената променена експозиционна величина е стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 1577.15 и SD 165.59, за олиото – Mean 1446.51 и SD 154.77, за 100% парафин – Mean 1394.21 и SD 172.61, а за калциевия карбонат – Mean 2138.85 и SD 162.26. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1686.06 (75% парафин / 25% CaCO₃), 1861.21 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 2032.94 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 317.84, 517.44 и 635.24. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.9 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 50mAs/26kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.12 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 26 kV и 50 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като единствената променена експозиционна величина е стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 1489.99 и SD 166.35, за олиото – Mean 1352.55 и SD 154.28, за 100% парафин – Mean 1306.46 и SD 172.30, а за калциевия карбонат – Mean 2051.19 и SD 161.41. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1599.03 (75% парафин / 25% CaCO₃), 1774.47 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 1945.99 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 317.16, 516.62 и 634.48. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и

медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.10 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 50mAs/24kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.13 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 24 kV и 50 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като са променени едновременно двете експозиционни величини – анодното напрежение kV и стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 1858.25 и SD 173.40, за олиото – Mean 1714.74 и SD 162.35, за 100% парафин – Mean 1665.76 и SD 181.05, а за калциевия карбонат – Mean 2449.25 и SD 178.36. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1969.34 (75% парафин / 25% CaCO₃), 2147.57 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 2332.35 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 333.72, 542.85 и 669.14. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.11 Резултати от сканиране на фантома с протокол на маммографската уредба: 50mAs/22kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.14 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 22 kV и 50 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като са променени едновременно двете експозиционни величини – анодното напрежение kV и стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различни и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 2324.17 и SD 184.92, за олиото – Mean 2170.81 и SD 172.14, за 100% парафин – Mean 2122.53 и SD 192.80, а за калциевия карбонат – Mean 2946.63 и SD 181.85. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 2432.24 (75% парафин / 25% CaCO₃), 2612.54 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 2812.18 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 353.98, 575.81 и 764.62.

Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.12 Резултати от сканиране на фантома с протокол на маммографската уредба: 50mAs/28kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.15 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 28 kV и 50 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като са променени едновременно двете експозиционни величини – анодното напрежение kV и стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различни и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 1190.89 и SD 159.84, за олиото – Mean 1058.91 и SD 148.10, за 100% парафин – Mean 1014.88 и SD 166.00, а за калциевия карбонат – Mean 1724.96 и SD 153.85. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1297.69 (75% парафин / 25% CaCO₃), 1470.99 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 1630.44 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 303.86, 492.80 и 660.55. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.13 Резултати от сканиране на фантома с протокол на маммографската уредба: 50mAs/30kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.16 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 30 kV и 50 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като са променени едновременно двете експозиционни величини – анодното напрежение kV и стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за

оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 935.15 и SD 153.48, за олиото – Mean 808.91 и SD 143.69, за 100% парафин – Mean 766.10 и SD 160.16, а за калциевия карбонат – Mean 1443.03 и SD 146.48. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1039.13 (75% парафин / 25% CaCO₃), 1211.47 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 1360.30 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 291.13, 468.82 и 563.66. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.14 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 28mAs/24kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.17 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 24 kV и 28 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като са променени едновременно двете експозиционни величини – анодното напрежение и стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 2342.46 и SD 176.08, за олиото – Mean 2197.11 и SD 163.86, за 100% парафин – Mean 2151.98 и SD 182.17, а за калциевия карбонат – Mean 2928.72 и SD 173.39. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 2448.99 (75% парафин / 25% CaCO₃), 2625.93 (50% парафин / 50% CaCO₃) и

2810.10 (25% парафин / 75% CaCO_3), със съответни стандартни отклонения 333.61, 544.21 и 669.03.

3.15 Резултати от сканиране на фантома с протокол на мамографската уредба: 28mAs/22kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.18 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 22 kV и 28 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като са променени едновременно двете експозиционни величини – анодното напрежение kV и стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различни и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm^2 за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 2809.53 и SD 186.28, за олиото – Mean 2654.27 и SD 175.55, за 100% парафин – Mean 2607.07 и SD 194.59, а за калциевия карбонат – Mean 3354.61 и SD 120.87. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 2916.13 (75% парафин / 25% CaCO_3), 3088.07 (50% парафин / 50% CaCO_3) и 3256.56 (25% парафин / 75% CaCO_3), със съответни стандартни отклонения 355.41, 554.44 и 602.03. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.16 Резултати от сканиране на фантома с протокол на маммографската уредба: 28mAs/28kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.19 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 28 kV и 28 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като са променени едновременно двете експозиционни величини – анодното напрежение kV и стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 1673.48 и SD 161.81, за олиото – Mean 1540.58 и SD 149.67, за 100% парафин – Mean 1496.81 и SD 167.15, а за калциевия карбонат – Mean 2207.95 и SD 155.00. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1779.32 (75% парафин / 25% CaCO₃), 1952.85 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 2111.78 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 305.55, 494.11 и 605.31. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.17 Резултати от сканиране на фантома с протокол на маммографската уредба: 28mAs/30kV (увеличени kV, mAs без промяна)

Таблица 1.20 ([Appendix](#)) показва резултати при сканиране с 30 kV и 28 mAs, отклонение от техническите параметри на референтния клиничен протокол (26 kV и 40 mAs), като са променени едновременно двете експозиционни величини – анодното напрежение kV и стойността на mAs.

При качествената оценка всички тестови структури на фантома остават успешно визуализирани. Маркерите за позициониране, линейните тестови обекти, решетките за

оценка на пространствената разделителна способност и всички групи микрокалцификати са ясно различими и отговарят на предварително зададените критерии за оценка.

Количественият анализ беше извършен чрез измерване на средна стойност (Mean), медиана (Median), стандартно отклонение (SD), минимална (Min) и максимална (Max) стойност в ROI с площ приблизително 100 mm² за седемте материални вложки. За водата са измерени Mean 1415.29 и SD 155.28, за олиото – Mean 1288.16 и SD 144.99, за 100% парафин – Mean 1245.00 и SD 161.54, а за калциевия карбонат – Mean 1924.21 и SD 147.47. При смесите от парафин и калциев карбонат са получени следните средни стойности: 1518.71 (75% парафин / 25% CaCO₃), 1691.10 (50% парафин / 50% CaCO₃) и 1838.05 (25% парафин / 75% CaCO₃), със съответни стандартни отклонения 292.21, 471.50 и 574.23. Спрямо референтното измерване при 26 kV и 40 mAs се наблюдават различия в количествените показатели за всички анализирани материали. Средните и медианните стойности се различават за всяка от седемте материални вложки, като са отчетени и различия в стойностите на стандартното отклонение, както и в минималните и максималните измерени пикселни стойности.

3.18 Входната доза при различни параметри на kV и mAs

Резултатите от измерването на входната доза (Entrance Dose) при всички двадесет използвани QA протокола, включващи референтния клиничен протокол (26 kV / 40 mAs), промяна единствено на анодното напрежение, промяна единствено на експозицията (mAs), както и комбинирана промяна на двата параметъра.

При четирите референтни измервания, извършени при 26 kV и 40 mAs, е отчетена еднаква стойност на входната доза – **2.59 mGy**, което показва добра повтораемост на измерванията. При изменение единствено на анодното напрежение, при постоянна стойност от 40 mAs, измерените стойности варират от **1.37 mGy** при 22 kV до **4.09 mGy** при 30 kV. При изменение единствено на експозицията, при постоянно анодно напрежение 26 kV, входната доза е в диапазона от **2.07 mGy** при 32 mAs до **3.24 mGy** при 50 mAs.

При комбинираната промяна на анодното напрежение и експозицията са отчетени стойности между **0.96 mGy** (22 kV / 28 mAs) и **5.11 mGy** (30 kV / 50 mAs). Всички измерени стойности са представени графично на **Фигура 16**, като позволяват директно сравнение между отделните QA протоколи и съответните измерени стойности на входната доза.

4 Дискусия и анализ на резултатите

4.1 Маркери за размер на полето

Резултатите от проверката на маркерите за размер на полето показаха, че разработеният фантом позволява надеждна оценка на правилното позициониране, центриране и колимация на мамографската система. При всички проведени експозиции маркерите са видими, без наличие на изрязване или изместване. Това показва, че експонираното поле съвпада с активната област на детектора и че не се наблюдават промени в геометрията на системата.

Интегрирането на позициониращите маркери в конструкцията на фантома позволява едновременно извършване на проверка на геометрията на експониране и на останалите тестове за качество на изображението, без необходимост от използване на отделни тестови обекти. Това съкращава времето за изпълнение на контрола на качеството и улеснява неговото прилагане в рутинната клинична практика.

Получените резултати потвърждават, че позициониращите маркери осигуряват достатъчна чувствителност за установяване на възможни отклонения в геометрията на системата при бъдещи проверки. В условията на периодичен контрол на качеството дори минимални промени в положението на експонираното поле или в центрирането на детектора могат да бъдат своевременно установени чрез визуално сравнение с референтните изображения. По този начин разработеният фантом не само позволява еднократна оценка на правилната настройка на мамографската система, но и създава възможност за проследяване на нейната геометрична стабилност във времето. Това повишава практическата стойност на фантома като средство за рутинен контрол на качеството и допринася за поддържането на постоянни условия за получаване на висококачествени мамографски изображения.

4.2 Групи микрокалцификации

Всички групи микрокалцификати бяха ясно визуализирани и останаха различни при проведените експериментални изследвания. Не се наблюдава намаляване на броя на видимите структури или промени в тяхната контрастност спрямо референтното изображение, което показва добра чувствителност на мамографската система към малки висококонтрастни обекти.

Включването на няколко групи микрокалцификати с различни размери позволява оценка на способността на мамографската система да визуализира изменения с различна степен на трудност. Това има особено значение при периодичния контрол на качеството, тъй като осигурява възможност за своевременно откриване на намалена контрастна чувствителност, която би могла да повлияе върху ранното откриване на патологични изменения в клиничната практика.

Наблюдаваната стабилност при визуализацията на всички групи микрокалцификати показва добра повторемост на резултатите при използваните експозиционни протоколи. Липсата на промени в броя на различимите структури създава надеждна референтна основа за последващи сравнения при рутинния контрол на качеството. При евентуални бъдещи отклонения в работата на мамографската система, свързани с промяна на качеството на изображението, този тест би позволил бързо установяване на намалена способност за възпроизвеждане на фините висококонтрастни детайли. По този начин микрокалцификационните групи допълват количествените измервания, извършвани чрез анализа на ROI, като осигуряват и визуална оценка на качеството на изображението.

4.3 Линейни вложки

Линейните вложки демонстрираха добра визуализация при всички проведени експозиции, като отделните структури останаха ясно различими по цялата си дължина. Не се наблюдаваха локални загуби на контраст, прекъсване на линиите или други изменения, които биха могли да бъдат свързани с влошаване на качеството на изображението.

Разполагането на линейни вложки с различна дебелина в един общ тестов модул позволява оценка на чувствителността на системата към постепенно намаляващ контраст и пространствен детайл. Това предоставя възможност за ранно установяване на промени в качеството на изображението, които не винаги могат да бъдат отчетени чрез стандартната визуална оценка.

Получените резултати показват, че линейните вложки осигуряват надежден визуален критерий за проследяване на пространствената разделителна способност на мамографската система. Запазването на ясната визуализация на всички линейни структури при различните експозиционни протоколи създава подходяща референтна основа за бъдещи сравнения при ежедневния и седмичния контрол на качеството. При

евентуални отклонения в работата на системата, проявяващи се чрез намалена способност за възпроизвеждане на фините детайли, подобни промени биха могли да бъдат установени чрез директно сравнение с референтните изображения. По този начин се допълват останалите тестови елементи на фантома и разширяват възможностите за комплексна оценка на качеството на мамографското изображение.

4.4 Решетки за пространствена разделителна способност

Изображенията на тестовите решетки показаха ясно разграничаване на отделните линии при всички пространствени честоти, включени във фантома. Не се наблюдаваха признаци на сливане на линиите или загуба на детайл, което показва, че пространствената разделителна способност на мамографската система остава стабилна при използваните експозиционни параметри.

Използването на няколко решетки с различна пространствена гъстота позволява проследяване на постепенно влошаване на разделителната способност във времето, а не само установяване на наличие или липса на дефект. Това повишава чувствителността на контрола на качеството и улеснява откриването на ранни промени в характеристиките на образната система.

Стабилната визуализация на всички решетки при проведените измервания потвърждава добрата възпроизводимост на теста и възможността той да бъде използван като надежден референтен показател при последващи проверки. Пространствената разделителна способност е един от основните параметри, определящи качеството на мамографското изображение, поради което нейното периодично проследяване е съществен елемент от програмите за контрол на качеството. Интегрирането на тестовите решетки в разработения фантом позволява тази оценка да се извършва едновременно с останалите проверки, без необходимост от използване на допълнителни тестови обекти, което повишава ефективността и практическата приложимост на предложения QA метод.

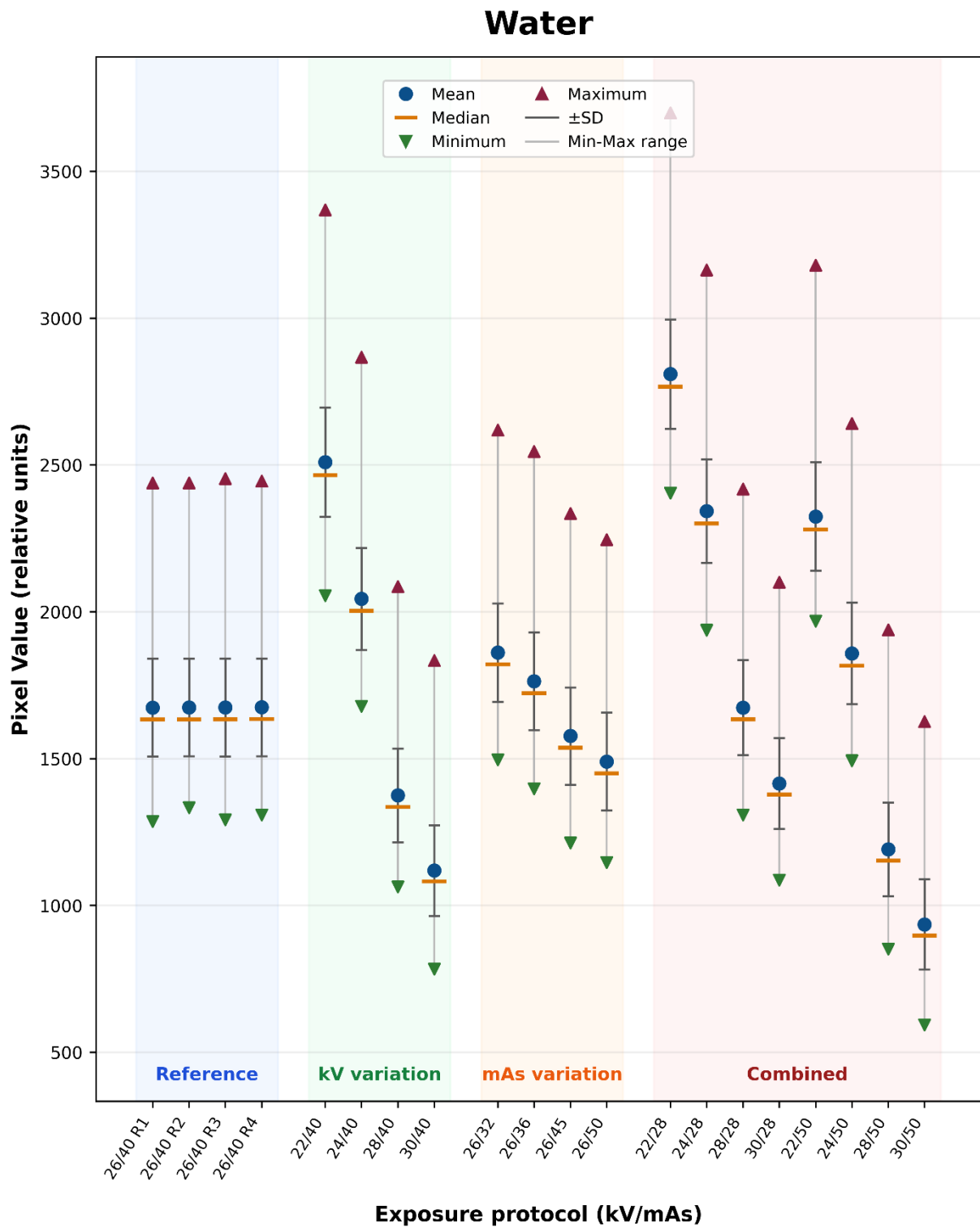
4.5 Капсули

4.5.1 Анализ на резултатите за капсула – вода

Фигура 9 представя резултатите от количествения анализ на капсулата, съдържаща вода, използвана като референтен материал при оценката на мамографската система. Водата е избрана поради добре известните си физични характеристики и широкото ѝ приложение като еталон при оценката на медицински образни системи. Четирите последователни референтни измервания, извършени при стандартния експозиционен протокол (26 kV и 40 mAs), показват много добра повтораемост. Стойностите на Mean, Median, SD, Minimum и Maximum остават в тесен диапазон, което потвърждава високата стабилност на измерванията и добрата възпроизводимост на системата при непроменени експозиционни условия.

При промяна единствено на анодното напрежение (kV), при постоянна стойност на mAs, се наблюдава последователно изменение на всички проследявани статистически показатели. Аналогична зависимост се отчита и при промяна само на експозицията (mAs) при фиксирано анодно напрежение. В двата случая Mean и Median следват почти идентична тенденция, което показва, че измененията в пикселните стойности са последователни и закономерни. Стойността на SD остава относително стабилна, което показва, че наблюдаваните промени се дължат основно на изменението на експозиционните параметри, а не на повишен шум или нестабилност на образната система.

Най-големи отклонения спрямо референтните измервания се наблюдават при едновременната промяна на kV и mAs, когато се изменят както енергията, така и броят на рентгеновите фотони. Получените резултати показват, че водната капсула реагира предвидимо на промените в експозиционните параметри и може успешно да служи като референтен материал при периодичния контрол на качеството.



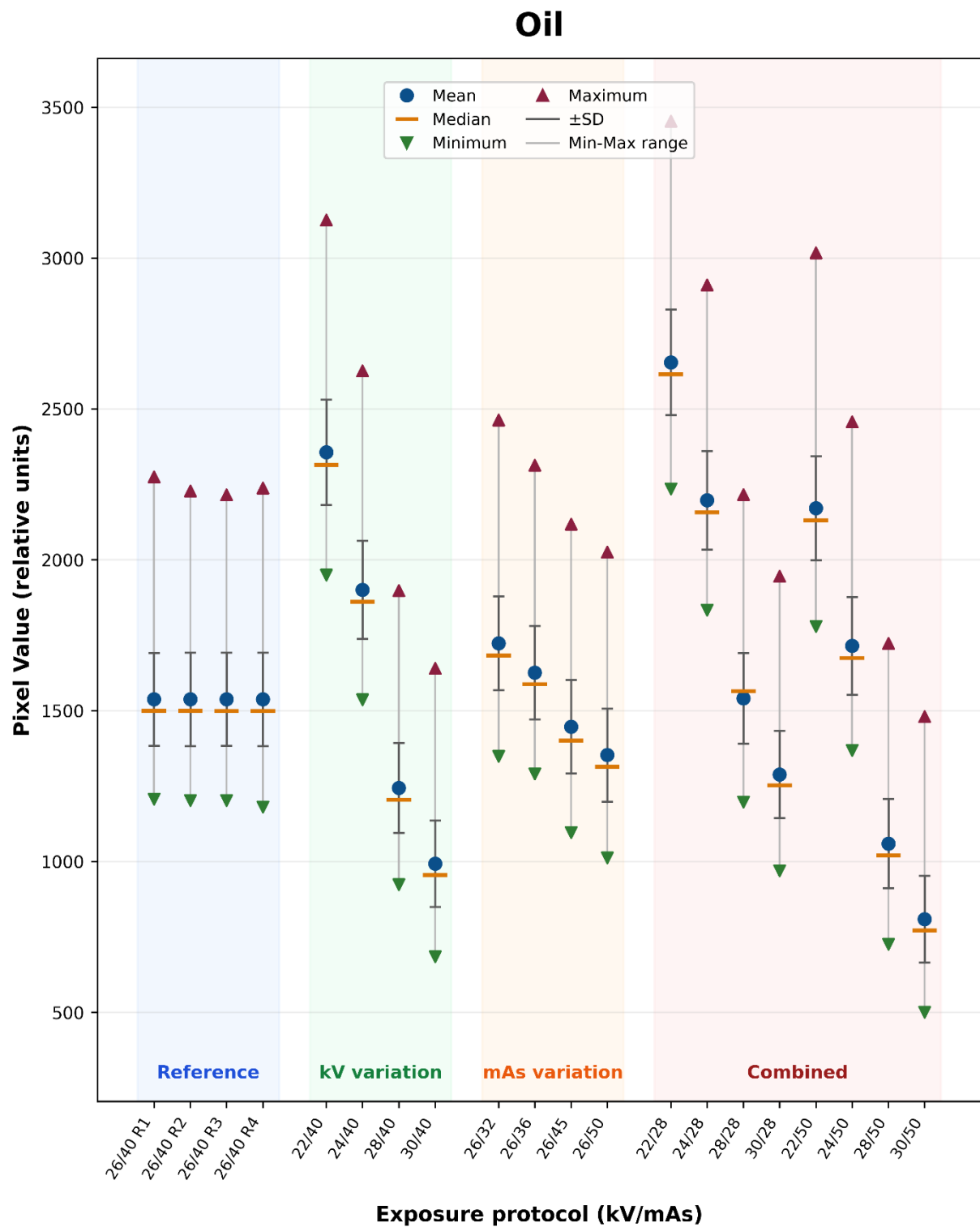
Фигура 9. Графика със стойностите, отчетени за капсула с вода

4.5.2 Анализ на резултатите за капсула – олио

Фигура 10 представя резултатите от количествения анализ на капсулата, съдържаща растително олио, използвано като материал за симулиране на мастната тъкан поради близките му рентгеноабсорбционни характеристики. Четирите референтни измервания, извършени при стандартния експозиционен протокол (26 kV и 40 mAs), показват добра повтораемост на всички анализирани статистически показатели. Стойностите на Mean, Median, SD, Minimum и Maximum остават в тесни граници, което потвърждава стабилността на измерванията и добрата възпроизводимост на разработения метод.

При изменение единствено на анодното напрежение (kV) се наблюдава постепенно изменение на всички статистически показатели, като Mean и Median следват сходна тенденция. Аналогично поведение се отчита и при промяна само на експозицията (mAs), като изменението на останалите статистически параметри остава последователно и пропорционално на промените в експозиционните условия. Наблюдаваните зависимости показват, че материалът реагира предвидимо на измененията в качеството и количеството на рентгеновото лъчение.

В сравнение с водата растителното олио формира по-ниски пикселни стойности, което съответства на неговото по-ниско рентгеново отслабване и по-нисък ефективен атомен номер. Това го прави подходящ материал за симулиране на мастната компонента на млечната жлеза и позволява проследяване на работата на мамографската система в диапазона на по-слабо поглъщащите материали. Най-големи отклонения спрямо референтния протокол се наблюдават при комбинираната промяна на kV и mAs, което потвърждава чувствителността на количествения анализ към изменения в експозиционните параметри.



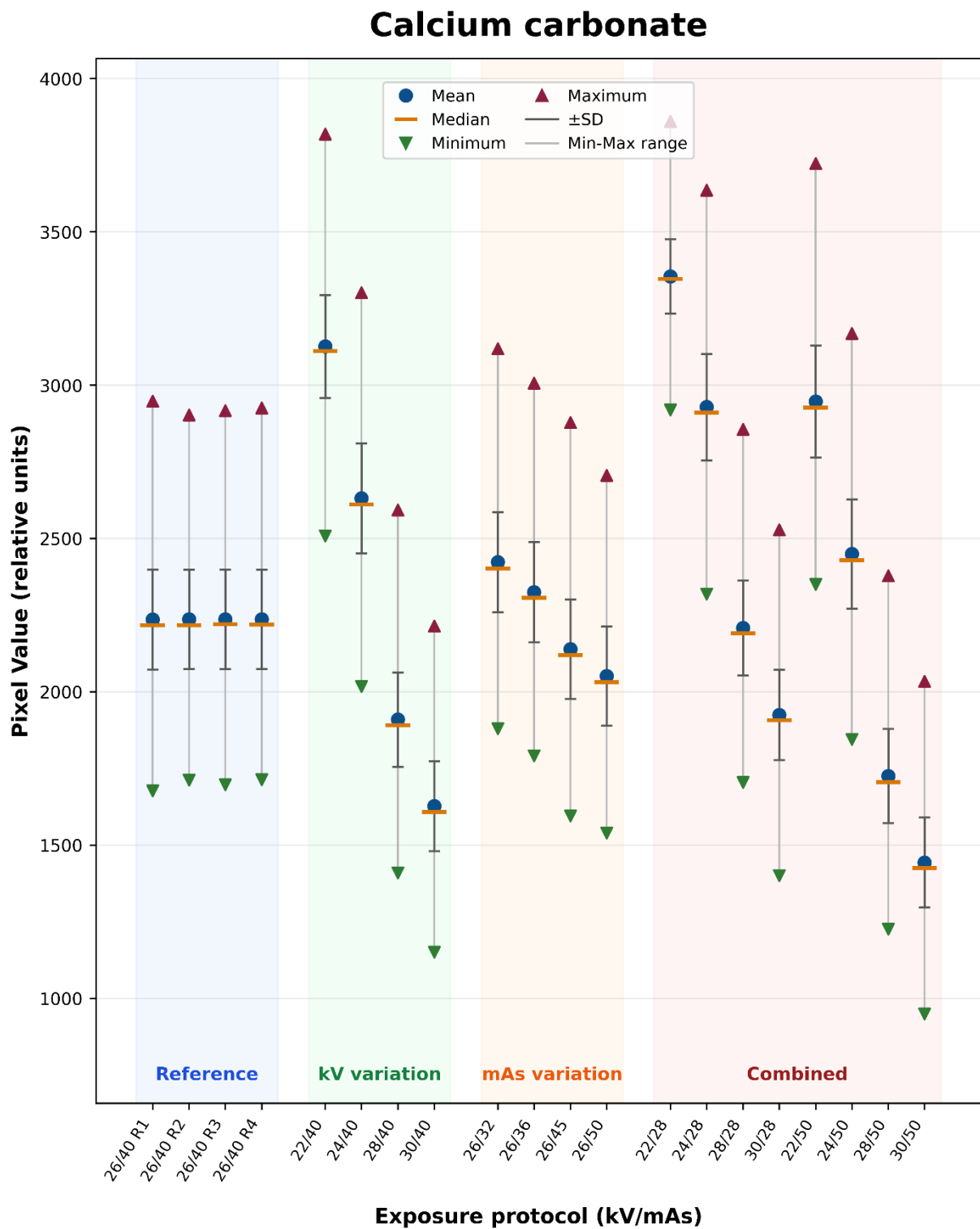
Фигура 10. Графика със стойностите, отчетени за капсула с олио

4.5.3 Анализ на резултатите за капсула – калциев карбонат

Фигура 11 представя резултатите от количествения анализ на капсулата, съдържаща калциев карбонат. Материалът е включен във фантома поради високата си плътност и ефективен атомен номер, което го прави подходящ за симулиране на силно рентгенопоглъщащи структури, аналогични на микрокалцификатите в млечната жлеза. Четирите референтни измервания, извършени при стандартния експозиционен протокол (26 kV и 40 mAs), показват висока повтораемост, като всички статистически показатели остават стабилни, а разликите между отделните измервания са минимални. Това потвърждава добрата възпроизводимост на количествения анализ и надеждността на разработения фантом.

При промяна единствено на анодното напрежение (kV) се наблюдава отчетливо изменение на Mean, съпроводено с аналогични промени при Median, Minimum и Maximum. Подобна зависимост се установява и при изменение само на експозицията (mAs), като всички статистически показатели следват последователна тенденция. В сравнение с водата и растителното олио, калциевият карбонат формира значително по-високи пикселни стойности, което е в съответствие с неговото по-високо рентгеново отслабване и по-голяма способност да абсорбира нискоенергийното мамографско лъчение.

Най-големи отклонения спрямо референтните измервания се наблюдават при комбинираната промяна на kV и mAs, когато едновременно се изменят енергията и интензитетът на рентгеновия сноп. Получените резултати показват, че материалът запазва ясна и предвидима зависимост между експозиционните параметри и измерените пикселни стойности. Това потвърждава, че включването на калциев карбонат във фантома осигурява надеждна количествена оценка на способността на мамографската система да визуализира силно рентгенопоглъщащи структури, които имат съществено значение за ранното откриване на микрокалцификати.



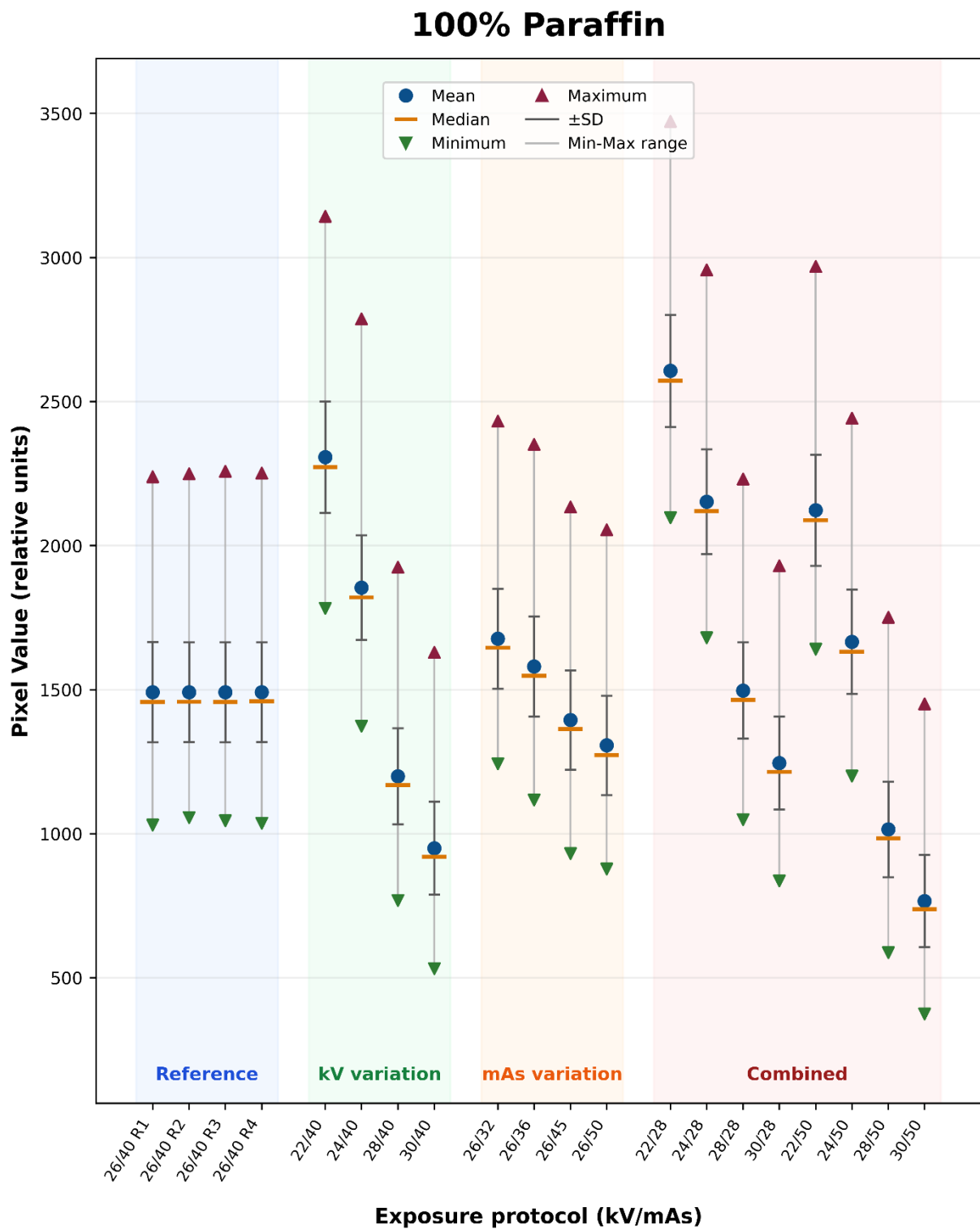
Фигура 11. Графика със стойностите, отчетени за капсула с калциев карбонат

4.5.4 Анализ на резултатите за капсула – 100% парафин

Фигура 12 представя резултатите от количествения анализ на капсулата, съдържаща 100% парафин. Материалът е включен във фантома като алтернативен модел на мастната тъкан, поради близките си рентгеноабсорбционни характеристики и широкото му приложение при разработването на физични фантоми. Четирите референтни измервания, извършени при стандартния QA протокол (26 kV и 40 mAs), показват добра възпроизводимост на всички анализирани статистически показатели. Стойностите на Mean, Median, SD, Minimum и Maximum остават в тесни граници, което потвърждава стабилността на измерванията при непроменени експозиционни условия.

При изменение единствено на анодното напрежение (kV) се наблюдава плавно и последователно изменение на всички статистически показатели, като същата тенденция се запазва и при промяна само на експозицията (mAs). Mean и Median следват сходно поведение, докато Minimum, Maximum и SD се изменят пропорционално на промените в експозиционните параметри. Получените зависимости показват, че парафинът реагира предвидимо на измененията в качеството и интензитета на рентгеновото лъчение.

Сравнението с капсулата, съдържаща растително олио, показва сходни тенденции в изменението на всички статистически показатели, което потвърждава, че двата материала притежават близки рентгеноабсорбционни свойства въпреки различния си химичен състав. Това дава възможност парафинът успешно да бъде използван като стабилен модел на мастна тъкан при количествен контрол на качеството. Най-големи отклонения спрямо референтните измервания се наблюдават при комбинираната промяна на kV и mAs, което още веднъж демонстрира чувствителността на разработения метод към изменения в експозиционните параметри.



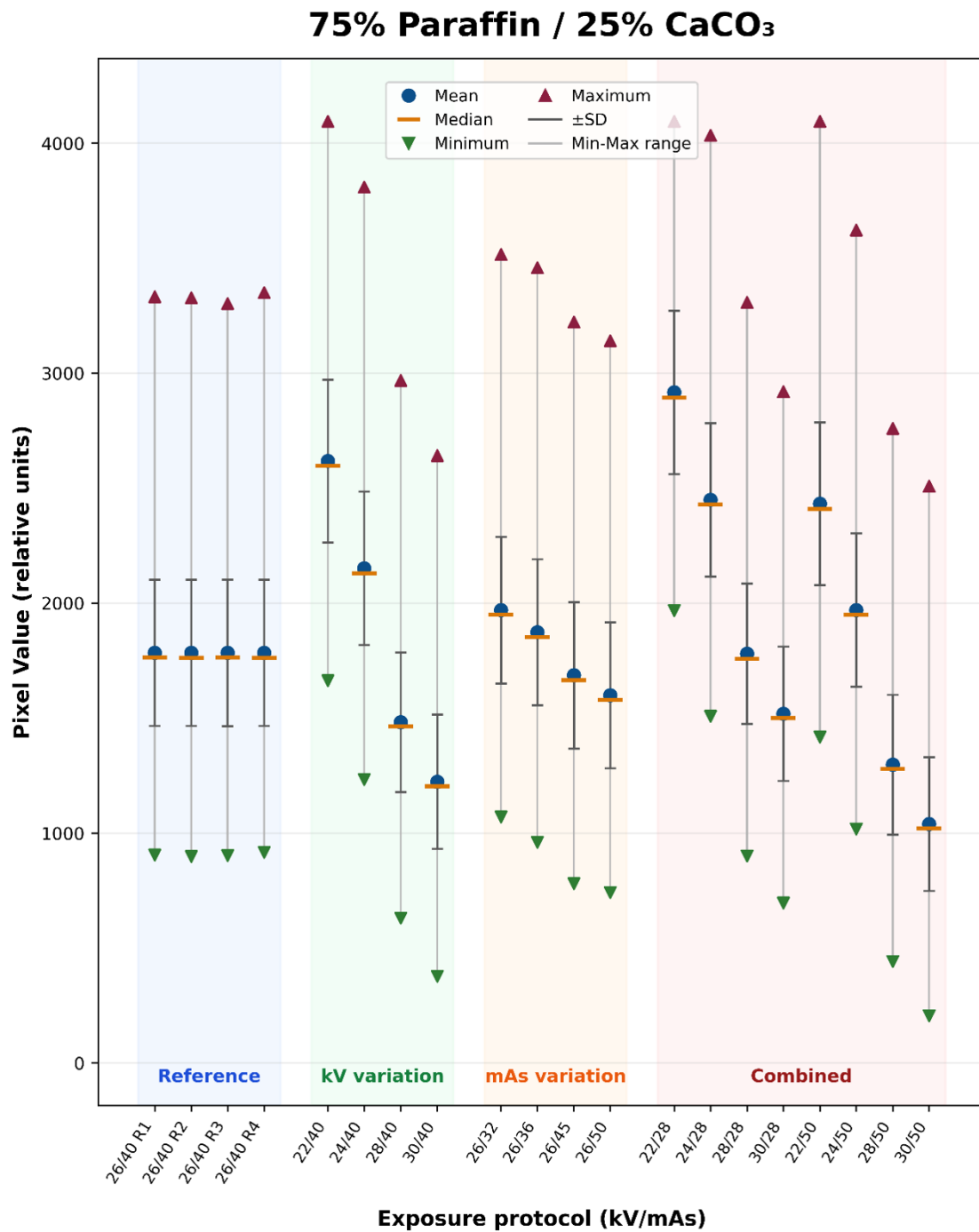
Фигура 12. Графика със стойностите, отчетени за капсула със 100% парафин

4.5.5 Анализ на резултатите за капсула – 75% парафин/25% калциев карбонат

Фигура 13 представя резултатите от количествения анализ на капсулата, съдържаща композитен материал от 75% парафин и 25% калциев карбонат. Включването на този материал има за цел да оцени възможността на разработения фантом да регистрира количествени промени в пикселните стойности при постепенно изменение на състава на материала. Четирите референтни измервания, извършени при стандартния QA протокол (26 kV и 40 mAs), показват добра повтораемост, като всички статистически показатели остават в тесни граници. Това потвърждава стабилността на композитния материал и добрата възпроизводимост на измерванията.

При промяна единствено на анодното напрежение (kV) се наблюдава последователно изменение на Mean, Median, Minimum, Maximum и SD, като аналогична тенденция се установява и при изменение само на експозицията (mAs). Получените зависимости са плавни и добре проследими, което показва, че композитният материал реагира предвидимо на измененията в експозиционните параметри.

В сравнение с капсулите, съдържащи чист парафин и чист калциев карбонат, измерените пикселни стойности за композитния материал заемат междинно положение, което съответства на неговия състав. Това показва, че разработеният фантом е чувствителен към промени в концентрацията на калциев карбонат и може да регистрира постепенни изменения в рентгеноабсорбционните характеристики на материала. Най-големи отклонения спрямо референтните измервания се наблюдават при комбинираната промяна на kV и mAs, което потвърждава възможността за използване на композитните материали при количествен контрол на качеството и проследяване на стабилността на мамографската система.



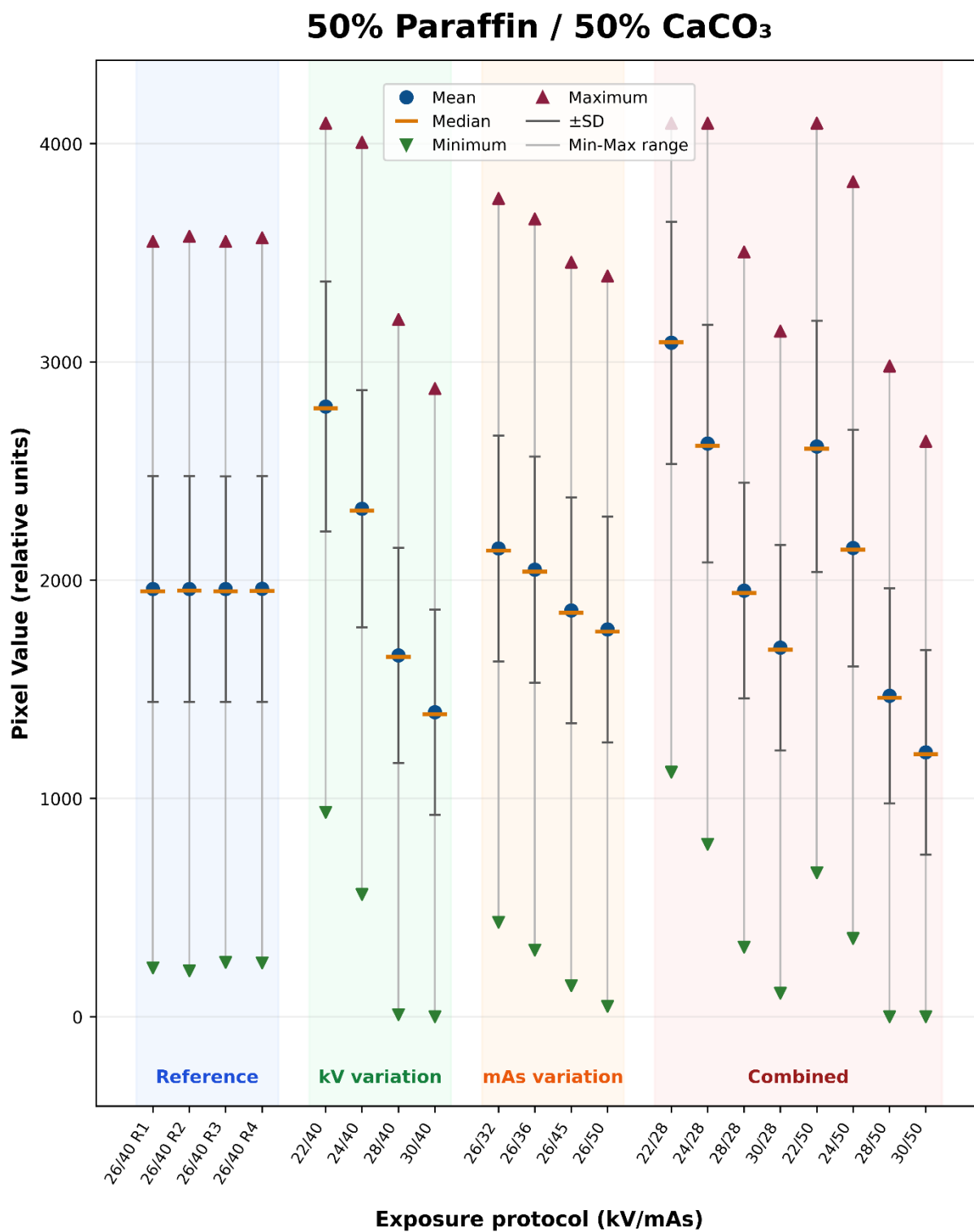
Фигура 13. Графика със стойностите, отчетени за капсула съдържаща 75% парафин и 25% калциев карбонат

4.5.6 Анализ на резултатите за капсула – 50% парафин/50% калциев карбонат

Фигура 14 представя резултатите от количествения анализ на капсулата, съдържаща композитен материал със съотношение 50% парафин и 50% калциев карбонат. Използването на равни количества от двата материала позволява да се оцени способността на разработения фантом да отчита количествени промени при междинен състав между мастноподобен и силно рентгенопоглъщащ материал. Четирите референтни измервания, извършени при стандартния QA протокол (26 kV и 40 mAs), показват добра стабилност, като всички статистически показатели се изменят минимално между отделните повторения.

При изменение само на анодното напрежение (kV) и само на експозицията (mAs) се наблюдават последователни изменения на всички анализирани показатели. Mean и Median запазват сходна тенденция, докато Minimum, Maximum и SD се изменят в съответствие с промяната на експозиционните параметри. Това показва, че композитният материал демонстрира предвидимо поведение и добра възпроизводимост при различните експозиционни условия.

Особен интерес представлява междинното положение на измерените пикселни стойности спрямо тези на чистия парафин и чистия калциев карбонат. Получените резултати показват, че количественият анализ отразява плавно промяна в състава на материала, което потвърждава чувствителността на разработения фантом към изменения в рентгеноабсорбционните характеристики. Най-големи отклонения от референтните стойности се наблюдават при комбинираната промяна на kV и mAs, като общата тенденция остава последователна и добре проследима.



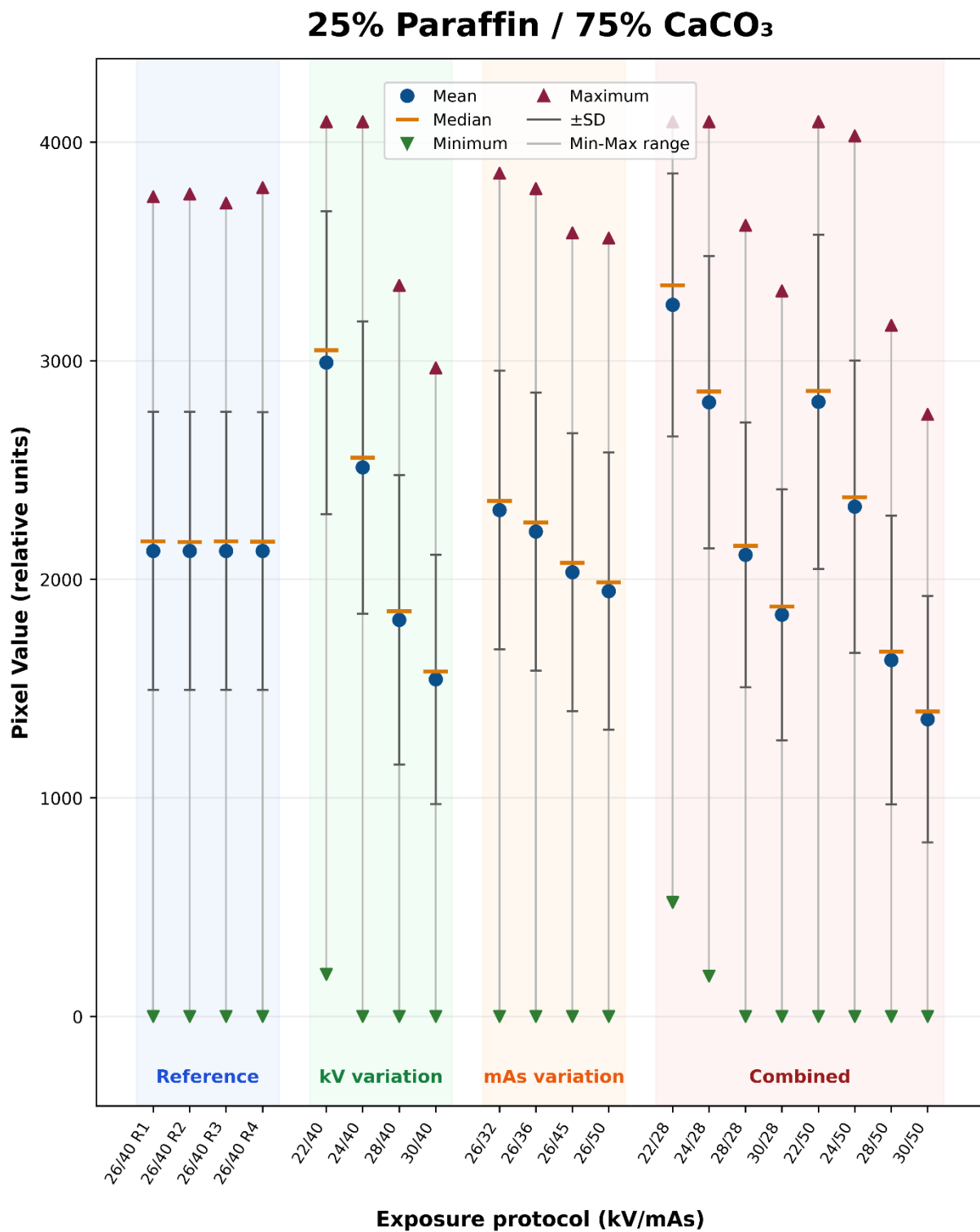
Фигура 14. Графика със стойностите, отчетени за капсула съдържаща 50% парафин и 50% калциев карбонат

4.5.7 Анализ на резултатите за капсула – 25% парафин/75% калциев карбонат

Фигура 15 представя резултатите от количествения анализ на капсулата, съдържаща композитен материал със съотношение 25% парафин и 75% калциев карбонат. Тази композиция е разработена с цел да се оцени поведението на материал с преобладаващо съдържание на калциев карбонат и да се проследи влиянието на по-високата концентрация на силно рентгенопоглътящ компонент върху измерените пикселни стойности. Четирите референтни измервания, извършени при стандартния QA протокол (26 kV и 40 mAs), показват добра повтораемост, като всички статистически показатели остават в тесни граници, което потвърждава стабилността и възпроизводимостта на измерванията.

При изменение единствено на анодното напрежение (kV) и при изменение само на експозицията (mAs) се наблюдават последователни изменения на Mean, Median, Minimum, Maximum и SD, които ясно следват промените в експозиционните параметри. Независимо от по-високото съдържание на калциев карбонат, материалът запазва предвидимо поведение и добра количествена възпроизводимост при всички изследвани експозиционни условия.

В сравнение с останалите два композитни материала, капсулата с 75% калциев карбонат формира най-високи пикселни стойности, като резултатите се доближават до тези на капсулата, съдържаща чист калциев карбонат. Наблюдаваната последователна промяна на статистическите показатели при увеличаване на концентрацията на калциев карбонат потвърждава, че разработеният фантом е чувствителен към малки изменения в състава на материала. Това позволява не само разграничаване на отделните материали, но и количествено проследяване на промените в рентгеноабсорбционните характеристики, което представлява съществено предимство при периодичния контрол на качеството на мамографските системи.



Фигура 15. Графика със стойностите, отчетени за капсула съдържаща 25% парафин и 75% калциев карбонат

4.6 Анализ на резултатите за входната доза при различни параметри на kV и mAs

Резултатите от измерването на входната доза (**Фигура 16**) показват висока повторяемост на референтните измервания, като и четирите експозиции, извършени при стандартния клиничен протокол (26 kV / 40 mAs), дават идентична стойност от 2.59 mGy. Това потвърждава добрата стабилност на мамографската система при непроменени експозиционни параметри и осигурява надеждна отправна точка за сравнение с всички останали експериментални протоколи.

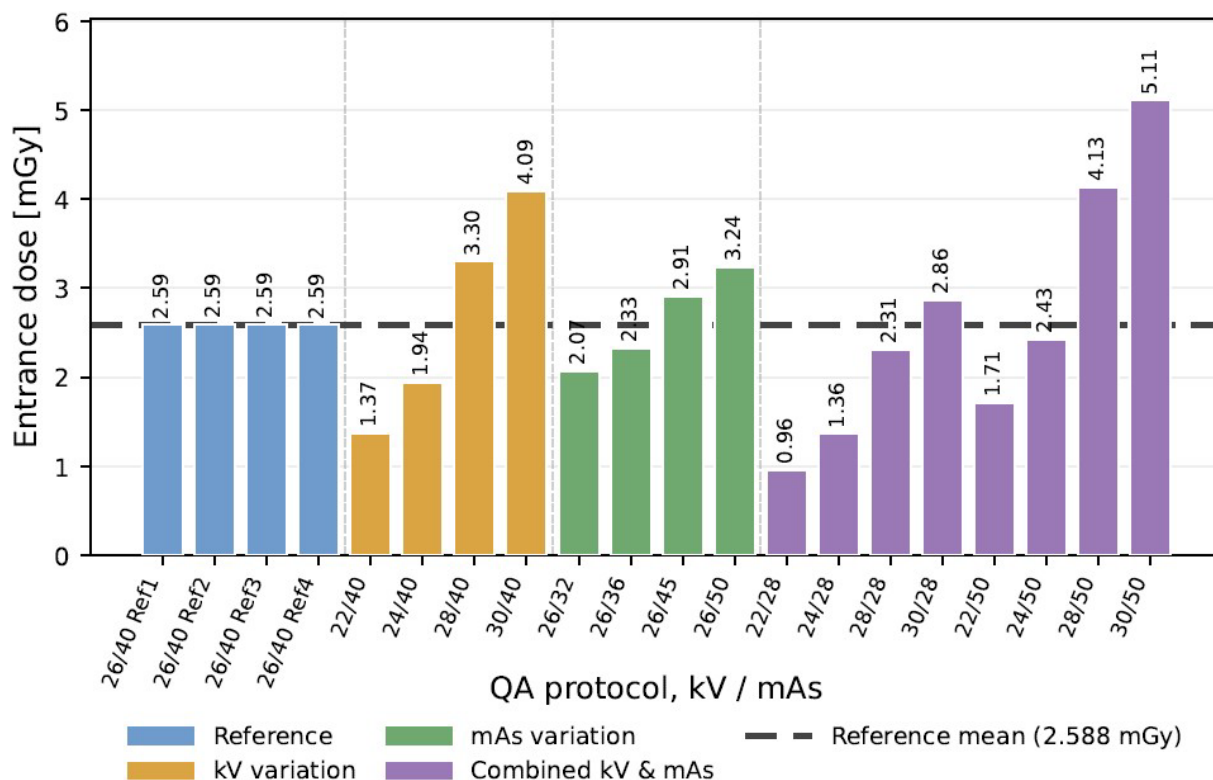
При изменение единствено на анодното напрежение се наблюдава ясно изразена и последователна промяна на измерената входна доза. С увеличаването на kV отчетените стойности нарастват постепенно, без наличие на резки отклонения или нарушаване на общата тенденция. Аналогично поведение се наблюдава и при серията, в която е променяна единствено стойността на mAs. При увеличаване на експозицията входната доза също се увеличава последователно, като всички измервания следват очакваната зависимост. Това показва добра възпроизводимост на резултатите и потвърждава, че използваните експозиционни параметри са приложени коректно при провеждането на експериментите.

Най-голям диапазон на входната доза е регистриран при комбинираната промяна на анодното напрежение и експозицията. Именно тази група протоколи обхваща както най-ниските, така и най-високите измерени стойности, което осигурява широк диапазон от експозиционни условия за оценка на поведението на разработения фантом. Получените резултати демонстрират, че избраните комбинации от kV и mAs създават ясно разграничими дозови нива, които могат да бъдат използвани за оценка на чувствителността на различните тестови елементи и материални вложки.

Съпоставянето на графиката за входната доза с количествените резултати от ROI анализа показва, че измененията на експозиционните параметри се съпровождат и от изменения в статистическите показатели на отделните материални вложки. За всички анализирани материали се наблюдават промени в средната стойност, медианата, минималната, максималната стойност и стандартното отклонение при преминаване между различните QA протоколи. Това показва, че разработеният фантом реагира последователно на измененията в експозиционните условия, като количествените

показатели от ROI анализа могат да бъдат използвани за проследяване на подобни отклонения при бъдещи проверки.

Практическата стойност на получения широк диапазон на входната доза се състои във възможността разработеният фантом да бъде използван за симулиране на различни сценарии, които могат да възникнат при експлоатацията на мамографската система. Това позволява оценка на поведението на тестовите структури не само при оптималните референтни условия, но и при експозиции, които се отклоняват в различна степен от клиничния протокол. По този начин разработеният QA метод създава предпоставки за своевременно установяване на изменения както в дозовите показатели, така и в количествените характеристики на полученото изображение, което допълнително разширява възможностите за приложение на разработения фантом при ежедневен и периодичен контрол на качеството.



Фигура 16. Графика за входната доза във фантома за различни стойности на анодното напрежение и ток

5 Заключение

Настоящата дипломна работа представя разработването, експерименталното тестване и оценката на нискобюджетен 3D-принтиран фантом, предназначен за периодичен контрол на качеството при мамографски уредби. Разработката е мотивирана от необходимостта от достъпно и практично средство за проследяване на постоянството на качеството на изображението между периодичните проверки, извършвани от специализирани организации. Анализът на съществуващата практика показва, че в редица лечебни заведения редовният седмичен контрол на качеството не се провежда поради липса на подходящи фантоми, ограничени финансови ресурси и недостиг на обучен персонал. Това създава предпоставки за постепенно влошаване на качеството на изображенията, което може да остане незабелязано за продължителен период от време.

В рамките на настоящото изследване беше разработен собствен CAD модел на мамографски QA фантом, оптимизиран за изработка чрез технологията FDM с използване на PLA като основен конструктивен материал. Конструкцията включва тестови обекти за оценка на размера на рентгеновото поле, групи микрокалцификации, линейни вложки за оценка на пространствената разделителна способност и седем капсули, съдържащи материали с различни физични характеристики. Освен физическия модел беше разработен и стандартизиран протокол за провеждане на седмичен контрол на качеството, който обединява визуалната оценка на тестовите структури с количествен анализ на изображенията чрез измерване на статистически показатели в предварително определени области на интерес (ROI).

Разработеният фантом беше експериментално валидиран чрез серия клинични експозиции на дигитална мамографска система, при които бяха симулирани както референтни условия, така и различни клинично значими отклонения на експозиционните параметри. Проведените изследвания показаха отлична повторяемост на референтните измервания, което потвърждава добрата възпроизводимост на разработената конструкция и надеждността на използваната методика за анализ.

Получените резултати демонстрират, че всички тестови структури реагират по предвидим начин при изменение на анодното напрежение и експозицията. Маркерите за размер на полето запазват правилното си положение, линейните вложки и решетките за пространствена разделителна способност позволяват визуално проследяване на измененията в качеството на изображението, а групите микрокалцификации

демонстрират чувствителност към промени в експозиционните условия. Особено показателни се оказаха резултатите от анализа на седемте материални капсули. За всички изследвани материали се наблюдава ясно изразена зависимост между експозиционните параметри и измерените статистически показатели – средна стойност, медиана, минимална и максимална стойност и стандартно отклонение. Независимо от различните физични свойства на използваните материали, всички капсули демонстрират последователно и възпроизводимо изменение на количествените характеристики при промяна на kV и mAs.

Допълнително проведените измервания на входната доза показват очакваната зависимост между експозиционните параметри и дозовото натоварване. Наблюдаваните изменения на входната доза кореспондират с измененията в количествените показатели, получени чрез ROI анализа, което потвърждава, че разработеният фантом позволява едновременно проследяване както на качеството на изображението, така и на последствията от измененията в експозиционните параметри. По този начин разработената методика предоставя по-обективна оценка на стабилността на мамографската система в сравнение с използването единствено на визуална оценка.

Едно от основните предимства на предложения фантом е възможността за неговото изработване с широко достъпни технологии за 3D-принтиране при значително по-ниска цена в сравнение с комерсиалните мамографски фантоми. Това създава реални предпоставки за по-широкото му внедряване в лечебните заведения като допълващ инструмент за ежедневен или седмичен контрол на качеството. Следва ясно да се подчертае, че разработеният фантом не е предназначен да замени стандартизираните комерсиални фантоми, използвани при акредитация и периодичен специализиран контрол, а да подпомогне регулярното проследяване на работата на мамографската система между официалните проверки и да съдейства за ранното откриване на потенциални отклонения.

Получените резултати показват, че поставените цели на дипломната работа са изпълнени успешно. Разработен е функционален, възпроизводим и практически приложим 3D-принтиран QA фантом, който позволява надеждно регистриране на изменения в експозиционните параметри чрез съчетаване на визуални тестове и количествен анализ на изображенията. Разработени са също методика за анализ и стандартизиран протокол, които улесняват практическото приложение на фантома в условията на рутинната клинична практика.

Бъдещото развитие на разработката може да бъде насочено към разширяване на набора от използвани материали с още по-близки до реалните тъкани рентгенови характеристики, оптимизиране на геометрията на отделните тестови структури и автоматизиране на анализа на изображенията чрез специализиран софтуер или алгоритми с елементи на изкуствен интелект. Допълнителни изследвания върху различни модели мамографски системи и при по-голям брой клинични експозиции биха позволили още по-задълбочена оценка на възможностите за практическо приложение на разработения фантом.

В заключение може да се обобщи, че настоящата работа демонстрира възможността съвременните технологии за триизмерно принтиране да бъдат успешно използвани за разработването на достъпни и ефективни средства за контрол на качеството в медицинската образна диагностика. Разработеният фантом съчетава ниска себестойност, добра възпроизводимост, практическа приложимост и чувствителност към клинично значими изменения на експозиционните параметри, което го прави перспективно средство за подпомагане на рутинния контрол на качеството при мамографски изследвания.

6 Приложения

6.1 Приложение №1 – Резултати от сканиране на фантома с различни протоколи на мамографската уредба:

https://drive.google.com/drive/folders/1Et26TZl9kcbUu_Q0kYfmSyR4LJyZCoHj

6.2 Приложение №2 – Приет за устна презентация доклад в European Congress of Medical Physics, Valencia, Spain 2026



EVENTS / EVENT / **ABSTRACTS**

Abstracts

50 ▾

Search

	Id.	Code	Title	Type	Authors	Status
Info	100		Development of a Low-Cost 3D-Printed Mammography QA Phantom	DIY-Fair	Gueorgui Gueorguiev , Martin Tsvetkov, Arianna Vossirini, Georgios Giakoumettis, Nikiforos Okkalidis, Hristiana Stefanova, Tzvetelina Todorova, Emil Georgiev	Accepted

Event

6TH ECMP 2026

- Registration
- Registration information
- Professional data

Gueorgui Gueorguiev
georguig09@gmail.com



Background and Aims:

Periodic mammography quality assurance (QA) is essential for maintaining high image quality at optimized dose levels. In Bulgaria, it is typically performed by external medical physicists; however, many healthcare facilities—especially smaller ones do not possess their own mammography phantoms or dedicated software for QA analysis. This lack of local resources may lead to irregular testing, reduced oversight between inspections/periodic QA, and potentially preventable diagnostic errors. The aim of this project is to develop and clinically validate low-cost, reproducible 3D-printed mammography QA phantom, ensuring accessible and standardized quality control nationwide.

Methods and Materials:

A CAD-designed 3D phantom was developed to simulate compressed breast equivalent. Multiple tissue-equivalent materials, such as wax, paraffine, calcium carbonate, were evaluated for appropriate attenuation in the 25–32 kVp range. Various embedded test objects were implemented to assess high- and low-contrast resolution, signal-to-noise ratio, modulation transfer function, and field-size accuracy, in addition to fiber-, speck-, and mass-like structures. The phantom was manufactured using 3D-printing parameters ensuring reproducibility and will be clinically validated in Bulgaria in summer of 2026.

Results:

Initial prototype prints and test exposures on clinical mammography systems demonstrated stable and reproducible visualization of the embedded test objects, including low-contrast inserts, calcification groups, and high-resolution bar patterns. The phantom allowed qualitative assessment of image quality, spatial resolution, and contrast detectability. Preliminary cost analysis indicates that the production cost is significantly lower than that of commercial mammography QA phantoms, supporting its potential for widespread adoption in routine weekly quality control.

Key Words:

Mammography QA; 3D printing; Low-cost phantom; Image quality; MTF; SNR; Patient safety; Web-based QA.

7 Библиография

- [1] World Health Organization, *Breast cancer: prevention and control*, WHO, 2023.
- [2] International Agency for Research on Cancer (IARC), *Breast Cancer Screening*, Lyon, France, 2016.
- [3] E. Samei et al., *Digital Mammography*, Springer, 2018.
- [4] A. Sechopoulos, “A review of breast tomosynthesis,” *Medical Physics*, vol. 40, no. 1, 2013.
- [5] CRCPD, *Mammography Phantom Image Quality Evaluation*, 2008.
- [6] American College of Radiology, *Mammography Quality Control Manual*, ACR, 2018.
- [7] FDA, *Mammography Quality Standards Act (MQSA)*, U.S. FDA, 2020.
- [8] ACR Accreditation Support, *Phantom Testing: Mammography*, 2024.
- [9] Nuclear Associates, *Mammographic Accreditation Phantom Specifications*, 2020.
- [10] Gammex Inc., *Mammographic Accreditation Phantom Model 156*, 2022.
- [11] European Commission, *European Guidelines for Quality Assurance in Breast Cancer Screening*, 2013.
- [12] ICRP, *Radiological Protection in Medicine*, ICRP Publication 105, 2007.
- [13] AAPM, *Quality Control in Diagnostic Radiology*, AAPM Report No. 74, 2002.
- [14] J. T. Bushberg et al., *The Essential Physics of Medical Imaging*, 3rd ed., Lippincott, 2012.
- [15] D. Dance et al., *Diagnostic Radiology Physics*, IPeM, 2014.
- [16] American College of Radiology, *Mammography Quality Control Manual*, ACR, 2018.
- [17] Nuclear Associates, *Mammographic Phantom Specifications*, 2020.
- [18] Gammex Inc., *Mammographic Accreditation Phantom Model 156*, 2022.
- [19] eBay.com, “Used Mammography Phantom Listings,” проверка направена Април 2026.
- [20] S. C. Daminabo, S. Goel, S. A. Grammatikos, H. Y. Nezhad, and V. K. Thakur, “Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): Techniques for polymer material systems,” *Materials Today Chemistry*, vol. 16, Art. no. 100248, Jun. 2020. T. M.
- [21] Joseph, A. Kallingal, A. M. Suresh, D. K. Mahapatra, M. S. Hasanin, J. Haponiuk, and S. Thomas, “Recent advances in 3D printing technologies and their applications in

biomedical engineering,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 125, pp. 1015–1035, 2023.

- [22] Bambu Lab, “Bambu Lab Official Store,” Available: <https://eu.store.bambulab.com/>. Accessed: Jun. 2026.