

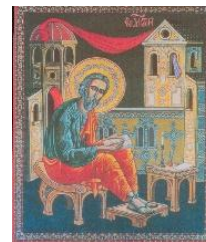


**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО РОБОТИКА**

България, София 1113, ПК 79, ул. "Акад. Г.Бончев", Бл.2,
Тел. (+359 2) 8703361, 4053055, Факс: (+359 2) 4053061

Почетен член на

"Съвета на Европейската научна и културна общност"



маг. Борислава Любомирова Костова

**Интегриране на 3D принтиране и роботика със
съвременни технологии за целите на
образованието**

АВТОРЕФЕРАТ

на

ДИСЕРТАЦИЯ

за придобиване на образователната и научна степен

"Доктор"

в научна специалност

***„Приложение на принципите и методите на кибернетиката в
различни области на науката“***

Научни ръководители:

Проф. д-р Иван Чавдаров

Доц. д.н. Галя Георгиева-Цанева

гр. София, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и допуснат до защита в Научно жури на разширено заседание на секция „Роботизирани и мехатронни интелигентни системи“ – РиМИС към Институт по роботика при БАН (ИР-БАН), състояло се на 13/07/2026г. по заповед на Директора № 85/07.07.2026г.

Докторантката работи в ИР-БАН, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл.2, гр. София. Тя е зачислена като задочен докторант в секция „РиМИС“ към ИР-БАН със заповед № 86/23.06.2023 г. и срок на обучение от 01.07.2023 г. до 01.07.2027 г.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в ИР – БАН.

Дисертацията е с общ обем от 150 страници и съдържа въведение, пет глави, 5 цели и задачи, заключение, 2 научно – приложни и 5 приложни приноса на дисертационния труд, 4 приложения, съдържащи администрираните въпросници, списък с публикации и забелязани цитирания, библиография от 140 разгледани източника, 13 таблици и 44 фигури.

Материалите по защитата са на разположение в канцеларията на ИР-БАН, блок 2, стая 406.

Научно жури:

Вътрешни членове

1. Проф. д-р Таньо Танев, ИР - БАН
 2. Доц. д-р Неда Чехларова, ИР - БАН
- Резервен член: Проф. д-р Мая Димитрова

Външни членове

3. Проф. д-р Николай Стоименов, ИИКТ – БАН
 4. Проф. д-р Иван Ячев, ТУ – София
 5. Проф. д-р Валентин Матеев, ТУ – София
- Резервен член: доц. д-р Мила Илиева-Обретенова, МГУ-София

Автор: Борислава Любомирова Костова

e-mail: borislava.kst@gmail.com

Заглавие: Интегриране на 3D принтиране и роботика със съвременни технологии за целите на образованието

Общи характеристики на дисертационния труд

Обектна област

Обектната област, към която е насочена научната и приложната дейност на дисертационния труд е използването на съвременни технологии за целите на образованието. Разгледано е приложението на технологиите за 3D моделиране, 3D печат, роботика и изкуствен интелект (ИИ) в три основни направления на образованието - традиционно общообразователно, профилирано в творчески дисциплини и насочено към ученици със специални образователни потребности (СОП).

Предмет на изследването са:

1. Протокол за провеждане на образователно STEAM занимание, включващ използване на ИИ в помощ на учителя, 3D принтирани образователни макети и сценарий за работа НАО. Протоколът е представен в Глава 2.
2. Подход за автоматизирано 3D моделиране на предмети с образователна цел. Подходът включва автоматизирано генериране на 3D модели в средата на AutoCAD и последващо изработване с 3D принтер. Алгоритъмът търси оптимални параметри в три направления: (1) адаптация към потребител, (2) адаптация към инструмент и (3) визуален ефект с образователна стойност. Подходът е представен в Глава 3.
3. Програма за автоматично 3D моделиране на пръстени в AutoCAD среда, разработена на базата на подхода. Програмата, наречена “rings”, е представена в Глава 4.
4. Програма за автоматизирано създаване на 3D модел на персонализирано устройство за писане за ученици със затруднения във фината моторика, разработена на базата на подхода. Програмата, наречена “pinky” е представена в Глава 5.

Актуалност на проблема

В съвременния глобален образователен контекст, моделът STEAM се е утвърдил като водеща педагогическа парадигма, обединяваща наука, технологии, инженерство, изкуства и математика в практически ориентирани учебни дейности, стимулиращи творческо мислене, решаване на проблеми и умения за работа в екип. Въпреки широкото признание на STEAM метода, практическото му интегриране в общото, профилираното и специалното образование се сблъсква с редица системни предизвикателства и бариери, описани в съществуващата научна литература.

Основна бариера представлява ограниченото и тясно фокусирано приложение на метода. Той се използва основно в извънкласни клубове, привличащи ученици, които вече изразяват интерес към наука, технологии, инженерство и математика (STEM). Тъй като STEM дисциплините са навлезли във всяка сфера на ежедневието и работния процес на всички професии, поддържането и развитието на интерес и ангажираност към тези дисциплини от страна на различни групи ученици е задача от съществено значение за пазара на труда, иновациите и икономическия растеж.

Регистрират се съществени липси и в съществуващите разработки в сферата на образованието на ученици със СОП. Въпреки големия брой научни изследвания и регистрирани ползотворни ефекти от учебни занимания с 3D принтиране, роботика и ИИ, в това образователно направление се наблюдава необходимост от помощни устройства за образователни цели, които да отговарят на променящите се индивидуални нужди на учениците със СОП на достъпна цена, с цел преодоляване на неравенството в достъпа до асистивни технологии.

Дефиниция на проблема

Липсват протоколи за адаптация и персонализиране на учебното съдържание според различните интереси на учениците. Понастоящем, приложението на STEAM методологията зависи в голяма степен от интердисциплинарни лични интереси на преподавателя. Основни предизвикателства пред ефективното STEAM образование са също ограниченото време за подготовка на такива уроци и за специализирана технологична квалификация на учителите. Образователната роботика и приложенията с ИИ предлагат интуитивни програмни решения за начинаещи, но липсва достъпен софтуер за автоматизирано използване на третата най-използвана технология в STEAM - 3D моделиране и принтиране. Такива програми могат да намалят когнитивната бариера при първоначалното усвояване на технологията, както и да предоставят високо ниво на персонализация и адаптация към потребностите и интересите на ученика.

Установява се, също така, недостатъчен брой научни разработки, изследващи потенциала на 3D принтирането за нискобюджетна реализация на персонализирани асистивни средства за ученици със СОП, както и емпирични данни относно тяхната ефективност.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертацията е да се разработи, валидира и анализира подход за интегриране на технологиите за 3D моделиране, 3D принтиране, роботика и ИИ с цел повишаване на ефективността на образователни STEAM занимания.

За изпълнение на поставената цел се дефинират следните основни задачи:

1. Да се разработи, валидира и анализира протокол за автоматизирана разработка на образователно STEAM занимание, включващо използване на ИИ в помощ на учителя, както и за неговото провеждане. Да се използват 3D принтирани образователни макети и сценарии с образователен робот;
2. Да се предложи подход за автоматизирано създаване на 3D принтирани персонализирани модели и тяхното приложение за образователни цели;
3. Да се разработи и създаде програма за автоматизирано 3D моделиране в AutoCAD среда, предназначена за създаване на декоративни елементи базирана на предложения подход. С разработената програма да се създадат и изследват 3D принтирани модели предназначени за обучение по приложни изкуства. Да се изследва приложението на подхода, разработеното програмно решение и 3D принтираните предмети в учебния процес;
4. Да се изследва и анализира ефективността на 3D принтирани помощни устройства за писане за ученици със СОП. Да се анализират подходи за създаване на персонализирани помощни устройства. В това число да се изследват методи за адаптация, вземане на индивидуални размери и определяне на основни геометрични параметри;
5. Да се разработи програма за автоматизирано създаване на 3D модел на персонализирано устройство за писане за ученици със затруднения във фината моторика. За създаването на това приложение да се ползват резултатите от точка 4.

Методология на изследването

В отговор на установените в научната литература изследователски ограничения и пропуски, са разработени (1) протокол за автоматизирано проектиране и реализация на интердисциплинарни STEAM уроци, базирана на синергичното използване на 3D технологии, социална роботика и генеративен ИИ и (2) подход за автоматизирано създаване на 3D принтирани персонализирани модели и тяхното приложение за образователни цели.

Предложеният протокол допринася за развитието на набора от практически инструменти на разположение на STEAM учителите, които подпомагат разбирането на метода и неговото по-широко и ефективно приложение. В процеса на разработка на дисертационния труд не са забелявани такива практически и автоматизирани протоколи. Настоящият протокол е валидиран в реална учебна среда с пилотно експериментално изследване на ефекта от приложението му върху ангажираността на учениците.

Разработеният подход за автоматизирано 3D моделиране на персонализирани образователни средства надгражда съществуващите такива с:

- Универсализация на дизайна чрез използвания принцип за опростен и минималистичен дизайн, който позволява бързо производство, итеративност и персонализация. Използвана е стандартизирана базова геометрия, преодолявайки ограниченията на технологията за 3D сканиране, на която са базирани съществуващите научни разработки.
- Разширена адаптация към нуждите на потребителя, към различни образователни предмети и нивото на знания.

Подходът е валидиран посредством разработката на две програми за автоматизирано 3D моделиране. Първата е наречена “rings” и е създадена за целите на образованието, профилирано в изкуства. Втората е наречена “pinku” и има за цел автоматизираното 3D моделиране на помощни устройства за писане за ученици със СОП.

Съдържание на дисертацията

I. ГЛАВА ПЪРВА: Литературен обзор на използването на технологията за 3D печат, роботиката и ИИ за целите на образованието

1. 1. Използване на 3D принтиране, роботика и ИИ в общообразователен STEAM контекст

1.1.1. Използване на 3D принтиране

Технологията за 3D принтиране намира широко приложение в STEAM образованието с цел визуализация на фундаментални понятия в различни дисциплини и тяхното приложение. Тя позволява усвояване както на компютърно моделиране (CAD), така и взаимодействие с готови 3D принтирани обекти, или и двете.

Основните предимства на технологията са свързани с финансовата достъпност при производството на персонализирани и сложни форми в единични бройки и високата екологична устойчивост. Някои софтуерни продукти за 3D моделиране, като AutoCAD, позволяват автоматизация на процеса, което спестява време, преодолява когнитивната бариера при навлизането в нова материя, повишава мотивацията и дигиталните умения на учениците.

Съществени ограничения при използването на технологията в образованието са сравнително бавното производство, първоначалните разходи за техника и консумативи, квалификационната бариера и липсата на време за усвояване на специализиран софтуер за CAD моделиране.

1.1.2. Използване на образователни роботи

Роботиката намира приложение в различни етапи на обучението. STEAM заниманията са реализирани чрез различни роботизирани системи, които могат да бъдат предварително сглобени или да се предоставят като модулни или 3D принтирани комплекти, социални хуманоидни роботи (като платформата NAO) и играчки-роботи. Технологията намира приложение като интерактивно средство за преподаване на програмиране, инженерство, чужди езици, чрез вградената софтуерна среда Choregraphe или програмния език Python. Основно предимство на тези системи е възможността за адаптиране на сложността на заниманията. Роботиката развива когнитивните функции като памет, логика и креативност, уменията за екипна работа и решаването на комплексни проблеми, като същевременно повишава мотивацията и устойчивостта на вниманието. Този ефект е особено осезаем при ученици с нисък академичен успех и деца със СОП. Като ключови ограничения се открояват сравнително високата пазарна цена, техническата сложност

при програмиране без предварителна подготовка и нуждата от поддръжка. Налице е и липсата на обучени преподаватели с необходимата техническа и педагогическа подготовка за масово внедряване на системите в учебния процес.

1.1.3. Използване на ИИ

Генеративните езикови модели с ИИ се развиват като нова форма на образователна технология в утвърдената изследователска област AIED. Основното предимство на използването на чатботове с ИИ в образованието е възможността за бърза персонализация на съдържанието спрямо индивидуалните потребности на ученика и постоянният достъп, подкрепящ саморегулираното учене. Внедряването им в образователния процес може да донесе съществени ползи за преподавателите, като подпомага фазите на подготовка и администрация, намалявайки психосоциалните рискове на професията като стрес и професионален бърнаут.

Като ключови недостатъци се очертават високият риск от прекомерна зависимост, ограничаване на критичното мислене и повърхностното усвояване на знания. Технологията крие риск от генериране на невярна или пристрастна информация, а необходимостта от интернет връзка и платени абонаменти създава предпоставка за неравенство в достъпа до образователни средства.

1.2. Използване на 3D принтиране, роботика и ИИ в профилираното артистично образование

Персонализирането на обучението според специфичната мотивация на различните групи ученици позволява повишаване на интереса към научно-технологичните дисциплини. Провеждането на таргетирани и адаптирани STEAM занятия, интегриращи художествени и творчески дейности, оказва положително влияние върху нагласите на ученици, които нямат предходен интерес в STEM дисциплините, и стимулира желанието им за академично и кариерно развитие в тези направления.

1.2.1. Използване на технологията за 3D печат

CAD технологиите и 3D принтирането намират широко приложение в специализираното обучение по изкуства. Като основно предимство се откроява възможността 3D принтирането да се използва като въвеждаща технология, улесняваща ангажирането на учениците с дигитален дизайн и творчески процеси, подпомагани от технологии. Сред основните недостатъци и ограничения се посочват липсата на отворени адаптирани софтуерни решения и детайлни протоколи за тяхното приложение в образователни дейности.

1.3. Използване на 3D принтиране, роботика и ИИ в образованието на ученици със СОП

1.3.1. Използване на роботизирани системи

Роботизираните асистиращи технологии (АТ) намират широко и ефективно приложение както в образователен, така и в терапевтичен контекст с цел подпомагане на академичното развитие, логопедичната терапия и ежедневните дейности (ерготерапия) на ученици със СОП.

1.3.2. Използване на ИИ

ИИ се използва в образованието на деца със СОП като средство за създаване на персонализирани и адаптивни обучителни среди. Едно от предимствата на системите с ИИ е възможността за анализ на поведението и реакциите на учениците в реално време и намиране на оптимални педагогически стратегии. Основни предизвикателства пред използването на технологията в сферата на образованието са защитата на лични данни и филтрирането на вярна информация получена от ИИ, особено в контекста на тази група ученици. Най-голяма ефективност в образователния процес се постига чрез сътрудничество между учители, терапевти, потребители, АТ и системи с ИИ. Отбелязва се изследователска празнина в разработката на практични протоколи за работа и автоматизирани системи, които да намалят необходимото време за обучение и да улеснят преодоляване на когнитивната бариера пред усвояването на нови технологични знания.

1.3.3. Използване на 3D принтиране

Технологията за 3D принтиране се утвърждава като нискотехнологично асистивно решение с висок образователен потенциал, осигуряващо достъпност в общаващото обучение. Тя позволява изработването на персонализирани образователни предмети и устройства.

Технологията се използва за икономически ефективно производство на адаптирани инструменти като захвати за писане. Такива помощни устройства за писане (ПУП) помагат за развитието на координацията око-ръка при деца с детска церебрална парализа (ДЦП). Отбелязва се, че съществуващите софтуерни решения имат ограничени функционалности. Забелязаните такива програми използват 3D сканиране, което възпрепятства извършването на промени в 3D модела и допълнителни итерации. Друг съществен недостатък е липсата на универсализиран дизайн с базова геометрия, което забавя производството.

Основните ограничения пред внедряването на технологията обуславят нуждата от разработване на програми за автоматизирано 3D моделиране, насочени както към терапевтите, така и към учениците.

1.4. Пропуски и ограничения в съществуващите изследвания

След прегледа на съществуващата научна литература са идентифицирани следните изследователски празнини, които ограничават ефективното приложение на STEAM метода в реална образователна среда:

(1) Липсата на протокол за автоматизирана разработка на интердисциплинарни STEAM уроци. За преодоляване на тази бариера, настоящата дисертация разработва и валидира структуриран и лесно приложим протокол за създаването на STEAM урок с трите най-популярни образователни технологии – 3D принтиране, роботика и ИИ.

(2) Липса на подход за преодоляване на когнитивните бариери пред усвояването на технологиите за 3D моделиране и принтиране. За преодоляване на тази бариера, е разработен подход за автоматизирано създаване на образователни материали с 3D принтиране. Подходът е валидиран с разработката на две експериментални програми в средата на AutoCAD, реализирани на програмния език Visual lisp. Целта на тези решения е:

- Да се намали техническата сложност чрез автоматизация;
- Да има образователен ефект чрез визуализация на стъпките в 3D моделирането;
- Да има високо ниво на персонализация чрез използване на индивидуални параметри или дизайни, според интересите на ученика;
- Дизайнът на предметите да следва принципите на минималистичния и опростен дизайн, за да се увеличи възможността за универсализация, повторяемост и бързо производство;

Целта е да се предложат нискобюджетни адаптирани решения чрез 3D печат, осигуряващи висока приложимост и педагогическа ефективност.

II. ГЛАВА ВТОРА: Протокол за провеждане на образователно STEAM занимание, включващ 3D принтиране, социален робот и чат бот с ИИ

2.1. Разработка на STEAM протокол за учебно занятие

Протоколът е разработен така, че да може да се възпроизведе независимо от професионалната експертиза и наличието на интердисциплинарни интереси на учителя, времевите ограничения, достъпът до вече съществуващи STEAM ресурси и идеи за дизайн на урок, както и от владееенето на английски език. Протоколът е илюстриран на Фигура 1 и включва следните стъпки:



Фигура 1: Блок-схема на предложения стъпков протокол за дизайн на STEAM урок.

Стъпка 1 - Избор на ресурси (учебен материал, STEAM интеграция на изкуство и технологии): Тази стъпка от протокола дефинира образователните елементи, съставляващи урока и тяхното взаимодействие.

Стъпка 2 - Идеино-концептуална фаза: Тази стъпка от протокола определя дизайна на урока, чрез който учебното съдържание може да бъде преподадено в съответствие с принципите на STEAM образованието.

Стъпка 3 - Избор на дизайн на урок: Извършва се анализ на резултатите, получени в Стъпка 2, избира се най-подходящата алтернатива на сценарии за учебно взаимодействие и се разработва включването на различните елементи, включително възможности за интегриране на изкуствата.

Стъпка 4 - Подготовката на технологични средства за STEAM урока

Тази стъпка изисква подготовка на технологичните средства, разработката на сценарии и 3D принтиране на образователни предмети.

Стъпка 5 - Провеждане на учебния час

Анкетно проучване

Анализ на резултатите

2.2. Приложение на създадения протокол в час по физика на тема „Електрическа проводимост“

Създаденият STEAM протокол е приложен за проектирането на урок в гимназиален етап (9ти клас) в общообразователно училище в гр. София, България. Избраната дисциплина е физика, което позволява STEAM протоколът да бъде тестован в контекст с повишена трудност за учениците.

Стъпка 1: Избор на ресурси

- **Урок:**

Темата на експерименталния урок е „Електрическа проводимост (електропроводимост) в различни среди“ и обхваща изучаването на нови понятия, свойства и физични закони.

- **STEAM подход**

Избраният фокус на конкретното STEAM занимание е урокът по физика, а изкуството е помощно средство. Целта на интердисциплинарния урок е да се повиши активното участие на учениците в учебния процес чрез насърчаване на ангажираността им, стимулиране на творческото мислене по темата на урока и чрез визуализиране на теоретичните знания.

- **Технология**

За експеримента са избрани най-често използваните технологии в STEAM образованието – хуманоиден робот NAO и 3D принтирани образователни макети.

Стъпка 2: Идейно – концептуална фаза

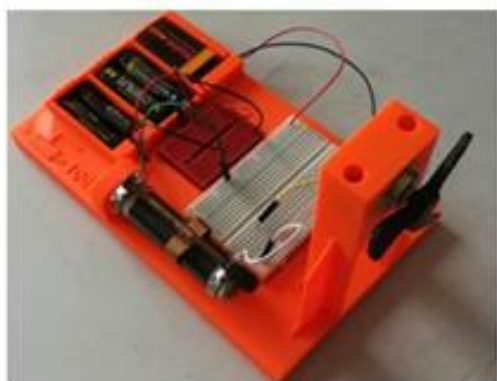
Проведено е търсене в Google и са проучени онлайн библиотеки с добри практики и готови уроци в областта на STEAM. Установена е липса на сценарий за конкретния урок. Автоматизацията на протокола е реализирана чрез използване

на Chat GPT-3.5, на който е зададено да създаде сценарий за провеждане на урока. По този начин успешно са дефинирани елементите, съставляващи урока и е направен детайлен план, въз основа на който се определят функциите на избраните технологии в учебния процес и конкретните сценарии на педагогическо взаимодействие.

- Технологията за 3D печат се използва за производство на персонализирани образователни системи;
- Роботът NAO се използва във фазата на тестване на придобитите знания на учениците, както и за провеждане на неформален разговор относно неговите възможности, с цел повишаване на интереса им към технологията.

Стъпка 3 - Избор на дизайн на урок:

В рамките на учебното занятие учениците работят с две 3D отпечатани експериментални системи. Първата е 3D отпечатан модел на електрическа верига, илюстриран на Фигура 2. Върху 3D отпечатаната платформа са монтирани 3 източника на захранване, консуматор, двигател за постоянен ток (DC), две платки за свързване на електрически вериги и потенциометър.



Фигура 2: 3D отпечатан модел на електрическа верига, създаден за целите на експеримента.

3D отпечатаният макет е моделиран така, че да бъде средство за учениците да решат практически задачи свързани с урока.

За творчески стимул в учебното занятие е избрана идея, генерирана от ИИ за интегриране на електролуминисцентни и светодиодни елементи като средство за визуализация на изучаваните физични процеси. Идеята системата да представява картата на България е на изследователския екип, без запитване към чатбота с ИИ. 3D принтираната карта (Фигура 3) е свързана в първата система (Фигура 2) и е оборудвана със светодиоди върху позицията на по-големите областни градове, които се активират при коректно реализиране на електрическа схема, съответстваща на разглеждания модел на електропроводимост на тока.



Фигура 3: Интерактивен модел на карта на България със светодиоди, разположени в по-големите градове.

Стъпка 4 - Подготовка на технологични средства за STEAM урока

3D принтираните макети са отпечатани. Разработен е сценарий за робота NAO, който в края на учебното занятие задава на учениците 11 въпроса по преподадения материал. Същият набор от въпроси е използван и в заключителния етап на учебния процес под формата на самостоятелен въпросник, предоставен на учениците за попълване в извънучебно време с цел оценяване на степента на усвояване на учебното съдържание.

Стъпка 5 - Провеждане на учебния час: Учебният час е проведен в две части, които включват преподаване на учебното съдържание и реализиране на експерименталните дейности.

2.3. Изследване на ефекта от приложението на STEAM протокола върху ангажираността на учениците от традиционен общообразователен клас

Изследването включва поведенческо наблюдение на ангажираността на учениците в трите части на урока, както и анкета, попълнена от учениците след учебния час. Тя се състои от две части. Първата част има за цел да провери усвояването на знанията, а втората – да регистрира техния опит и впечатления от учебния час по физика, подпомогнат от технологии. Резултатите, постигнати от всеки ученик в първата част на анкетата (усвояване на знания), са обобщени и изразени като сбор от всички верни отговори, като за всеки правилен отговор е дадена 1 точка, а за грешен - 0. Изчислена е аритметичната средна стойност на резултатите на контролната и експерименталната група, като получените данни са представени в Таблица 1.

Учениците от 9-ти А клас ($n = 11$) представляват контролната група, а 9-ти Б клас – експерименталната ($n=23$). Резултатите на двама ученици от 9-ти Б клас са отстранени от анализа поради нулеви предадени резултати. Преподавателят по физика е провел урока си с 9-ти А клас по традиционен метод.

Таблица 1: Резултатите на учениците в теста за усвояване на знания.

Група	Среден аритметичен резултат	Брой ученици	SD (стандартно отклонение)	Р-стойност	Резултат
Контролна група (клас 9а)	8.00	11	2.65	0.2974	p>0.05, NS
Експериментална група (клас 9б)	8.95	21	1.71		

Анализът на данните от анкетата за усвояване на материали показва, че разликата в средните резултати на двете групи на теста за усвояване на материал не достига статистическа значимост.

С цел допълнително изследване на конструкта „ангажираност“, статистически са изследвани и различните атрибути, които го изграждат. Те са регистрирани чрез поведенческо наблюдение. Извадката е съставена от експерименталната група, в която броят ученици е $n = 23$ т.е. не са изключени учениците, които в последствие са дали невалиден тест. Изменението в отношението и участието на учениците е регистрирано по време на отделните части на учебния час и резултатите са представени в Таблица 2. Например, при атрибута "Положителна емоция" е отбелязан броя на учениците, които са демонстрирали съответното поведение или емоция в трите различни етапа (Част 1, Част 2 и Част 3) от изследването т.е. честотата, при която е регистриран този атрибут. Част 1 се отнася до частта от урока, която е посветена на традиционно преподаване, част 2 – на взаимодействие с технологията за 3D печат, а част 3 – на работа с NAO.

Таблица 2: Оценка на активността на учениците по всеки индикатор.

	Параметри			Средна стойност и стандартно отклонение (SD)			Р стойност	
	Част 1	Част 2	Част 3	Част 1	Част 2	Част 3	Част 1/Част 2	Част 1/Част 3
Положителна емоция	2	18	21	0.09 (0.29)	0.78 (0.42)	0.91 (0.29)	0.0001	0.0001
Усилие при отговаряне на насочващи въпроси	6	14	20	0.26 (0.45)	0.61 (0.5)	0.87 (0.34)	0.0168	0.0001
Вербално участие	17	18	20	0.74 (0.45)	0.78 (0.42)	0.87 (0.34)	NS	NS

Усилие при проследяване на предствянето на учителя	17	18	20	0.74 (0.45)	0.78 (0.42)	0.87 (0.34)	NS	NS
Внимание	19	20	21	0.83 (0.39)	0.87 (0.34)	0.91 (0.29)	NS	NS

За статистическата обработка на данните е използван t-тест за зависими извадки (paired samples t-test), чрез който се сравняват показателите на едни и същи субекти в различните етапи на обучението. Всеки ученик, проявил положително отношение съгласно съответния индикатор, е оценен с резултат 1, а при липса на такова – с резултат 0. Определени са средните стойности, стандартното отклонение (sd) и р-стойността за всяка група и за всеки индикатор, като са сравнени показателите между Част 1 и Част 2, както и между Част 1 и Част 3.

Стойностите без статистическа значимост са означени с NS (Not Significant). Проведеното изследване показва, че по показателите „Усилие при отговаряне на водещите въпроси на учителя“ и „Положителна емоция“ се установяват статистически значими разлики ($p < 0.05$) в ангажираността на учениците в отделните части на учебния час. Това е пряк индикатор за положителното влияние на технологиите (в случая 3D принтер и хуманоиден робот NAO) върху качеството на образователния процес.

Допълнително е приложен χ^2 критерий за независимост и McNemar тест. Използвани са реалните промени в отношението на учениците, изведени и в 5. Установява се статистически значимо нарастване в броя на учениците, демонстриращи положителна емоция. При прехода от Част 1 към Част 2, $\chi^2 (1) = 14.06$, степен на свобода = 1, $p = 0.0000019$. При прехода от Част 1 към Част 3, $\chi^2 (1) = 17.05$, $p = 0.00000002$.

При показателя „Усилие при отговаряне на насочващи въпроси“ нарастването на посоченото позитивно поведение е статистически значимо в Част 2 $\chi^2 (1) = 6.13$, $p = 0.0173409$, $p < 0.05$. В Част 3 то достига $\chi^2 (1) = 12.07$, $p = 0.0000313$, както е показано на Таблица 3.

При този показател, размерът на ефекта в педагогическата част с 3D принтирането не е толкова статистически значим. При качествения анализ на данните се наблюдава отчетлива специфика, която би могла да обясни този факт. Момичетата проявяват значително по-висока активност и когнитивно усилие именно по време на работата с 3D технологиите. Тъй като тази подгрупа е представена от едва 9 души, реалният позитивен ефект сред момичетата бива частично неутрализиран.

Таблица 3: Chi Square и McNemar тест.

	χ^2	Степен на сво- бода (df)	Значимост (p)	
Положителна емоция				
Част 1 към Част 2 (3D принтиране)	14.06	1	0.0000019	$p<0.001$
Част 1 към Част 3 (робот NAO)	17.05	1	0.00000002	$p<0.001$
Усилие при отговаряне на насочващи въ- проси:				
Част 1 към Част 2 (3D принтиране)	6.13	1	0.0173409	$p<0.05$
Част 1 към Част 3 (робот NAO)	12.07	1	0.0000313	$p<0.001$

Наблюдавани са динамиката на ученическата ангажираност със специално внимание към поведението на учениците, които са пасивни по време на традиционната част на урока. То се променя към умерено активно до активно при взаимодействието им, в по-малки групи, с 3D отпечатания учебен комплект и робота NAO. Наблюдава се, че броят на активните ученици при участието на NAO в урока се е увеличил двукратно (достигайки приблизително половината от всички ученици). Докато в теоретичната фаза на урока (Част 1) близо половината от извадката ($n=10$) проявява пасивно поведение, то при въвеждането на 3D принтирания модел и робота NAO, броят на силно ангажираните ученици нараства съответно до 12 и 16 души. Резултатите от t-теста за зависими извадки потвърждават, че тези промени са резултат от промяната в образователната среда ($p < 0.05$).

Отбелязва се, че момичетата проявяват ентусиазъм при представянето на урока с помощта на технологии, като при взаимодействието с 3D принтираните макети наблюдаваният интерес при тях е по-голям, отколкото при момчетата. Това е индикатор, че технологията може да се използва успешно с цел "преодоляване на апатията" към технологиите чрез творчество.

2.4. Изводи от втора глава

Разработен е протокол за проектиране и реализация на интердисциплинарни STEAM уроци, базиран на синергичното използване на 3D технологии и хуманоген робот NAO. Протоколът позволява автоматизация на процеса посредством използването на чатбот с генеративен ИИ. Емпирично е доказана ефективността на протокола чрез апробация в реална учебна среда (урок по физика), като е регистрирано статистически значимо повишаване на емоционалната и когнитивната ангажираност на учениците. Тези резултати потвърждават, че интегрираното използване на технологии в STEAM класните стаи води до положителен ученически опит. Прилагането на стъпков протокол при проектирането на STEAM урок може да бъде успешно средство за по-ефективно прилагане на STEAM пе-

дагогиката, независимо от индивидуалните интердисциплинарни интереси и професионалния опит на учителя. Чатботове с ИИ предоставят възможност за генериране на множество идеи за персонализиране на уроци, съобразени с нуждите и интересите на учениците, които могат да бъдат реализирани чрез технологията за 3D печат и образователни роботи.

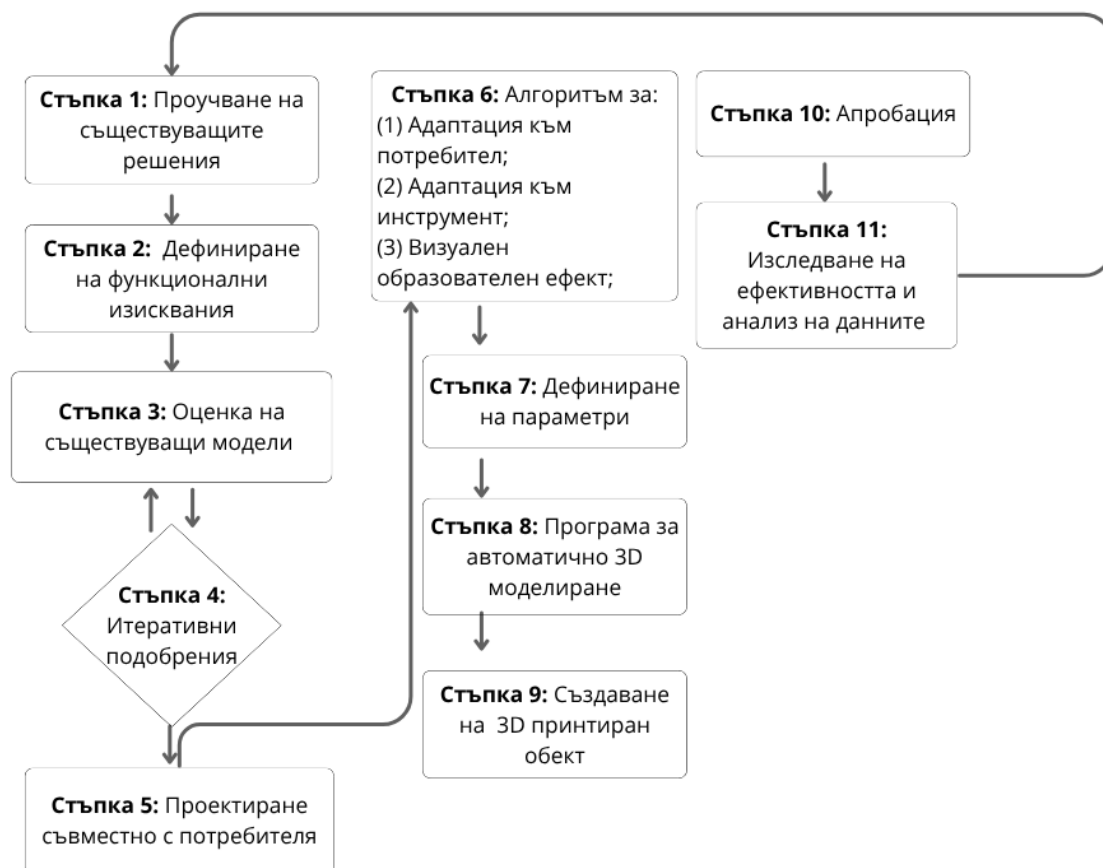
Ограничения на изследването:

Съществено ограничение на проведеното експериментално изследване представлява малкият брой участници и неравното им разпределение в контролната и експерименталната група. Хомогенността между групите също не е изследвана. При по-голяма извадка и повторно изследване тези ограничения биха се преодолели.

III. ГЛАВА ТРЕТА: Подход за създаване и приложение на 3D принтирани устройства предназначени за образователни цели

3.1. Разработка на подход за автоматизирано създаване на 3D принтирани устройства за образователни цели

Подходът е илюстриран на Фигура 5.



Фигура 4: Стъпков подход за създаване на 3D принтирани устройства предназначени за образователни цели.

Основните стъпки в предложения подход са следните:

Стъпка 1 – Проучване на съществуващи решения: На базата на дефинираните цели и предмет на разработка, се извършва търсене на съществуващи модели. Резултати могат да се получат както от търсене в академични бази данни, така и от библиотеки за отворено споделяне на .stl файлове като Thingiverse.com.

Стъпка 2 – Дефиниране на типови функционални изисквания;

Дефинират се необходимите универсални функционални характеристики, които следва да бъдат удовлетворени. Това включва, например, определяне на дисциплинарната област като приложни изкуства, STEAM, физика, графомоторика, ерготерапия, тренировки за захващане на предмети и др.

Стъпка 3 – Оценка на съществуващи 3D модели;

Стъпка 4 - Итеративни подобрения с цел повишаване на ефективността:

Регистрират се първоначалните параметри за модификация на съществуващите концепции. Извършва се сравнителен анализ и необходими корекции във входните параметри.

Стъпка 5 - Избор на метод за разработка съвместно с потребителя

Прилагат се принципите на проектиране съвместно с потребителя, за да се повиши ефективността и мотивацията за използването на устройството или макета. Избира се най-подходящият подход за взаимодействие, съобразен с когнитивния и физически профил на потребителя.

Стъпка 6 - Алгоритъм за адаптация: В тази стъпка получените в Стъпка 5 индивидуални параметри на потребителя се анализират, за да се моделира конкретният персонализиран дизайн на обекта. Разработването е адаптирано към индивидуалните нужни на потребителя по три основни направления:

- Адаптация към потребител (Персонализация): Анализират се индивидуалните предпочитания и потребности на потребителя.
- Адаптация към инструмент: Анализират се спецификите на учебните материали, към които се интегрират 3D принтирани пособия.
- Визуален и образователен ефект: Анализира се нивото на технологична компетентност на потребителите и се разработват визуализации или информативни елементи, които да стимулират техните възприятия и мотивация за продължаващо образование в сферата на 3D принтирането.

Стъпка 7. Дефиниране на параметри: Определят се основните променливи, които са параметрите с данни, специфични за всеки потребител. Те се въвеждат чрез диалогови прозорци. Определят се границите на всички входни параметри (напр. минимален/максимален диаметър, минимален/ максимален ъгъл).

Стъпка 8. Програма за автоматизирано 3D моделиране.

Въз основа на предходните стъпки се създава програма, която автоматично генерира 3D модел в CAD софтуер. За целите на дисертацията се използва средата на AutoCAD. Програмата създава 3D модел и .stl файл. Създаденият модел може допълнително да се обработва в CAD средата. Това позволява допълнителна персонализация и адаптация.

Стъпка 9: Създаване на 3D принтиран образователен обект

Стъпка 10: Аprobация в реална образователна среда

Стъпка 11: Качествено/ количествено проучване на ефективността и анализ на данните

3.2. Изводи от трета глава

Разработеният за целите на дисертацията подход допълва съществуващите изследвания в областта в няколко направления:

- Подходът може да се използва за включване на автоматизирано 3D моделиране в различни етапи на училищното образование и в различни образователни направления. Разработката има за цел максимално улеснение и преодоляване на когнитивните бариери както в материалната реализация на 3D принтирани образователни предмети, така и в усвояването на умения за работа със софтуер за 3D моделиране.
- Предложена е по-голяма степен на универсализация, чрез принципа на опростения и минималистичен дизайн. Подходът предвижда използването на стандартизирана базова геометрия, която преодолява ограниченията на технологията за 3D сканиране.
- Предлага се адаптация не само към потребителя, но и към различни инструменти и образователни материали.

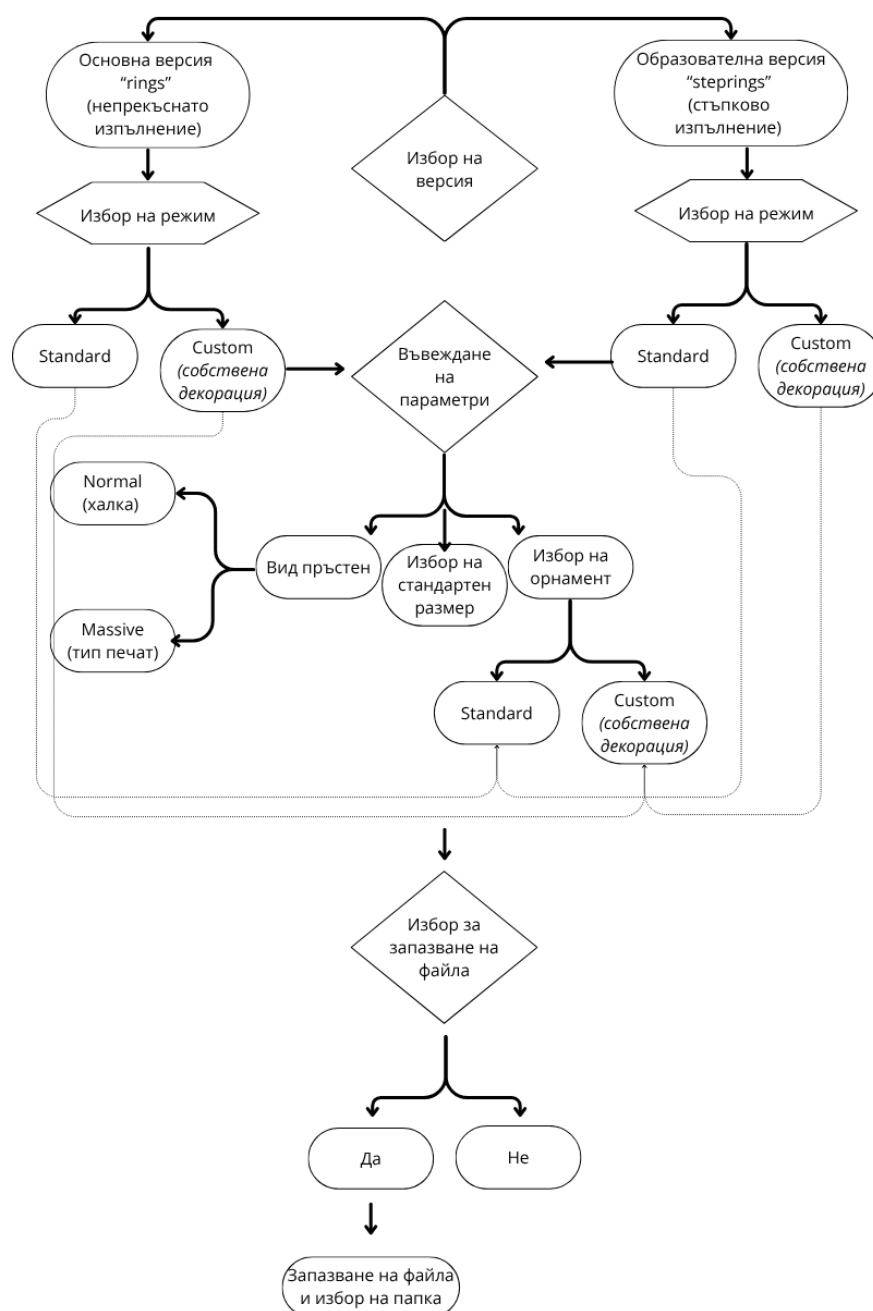
Активен участник в реализацията на настоящия подход е крайният потребител, чиито индивидуални предпочитания и анатомични параметри са в основата на разработките.

IV. ГЛАВА ЧЕТВЪРТА: Разработка и апробация на програма за персонализирано 3D моделиране за целите на профилираното артистично образование

4.1. Разработка на програмата “rings”

Представен е процесът на създаване и тестване на програма за автоматизирано 3D моделиране на пръстени в средата на AutoCAD за целите на профилираното артистично образование. Използван е подходът илюстриран в Глава 3.

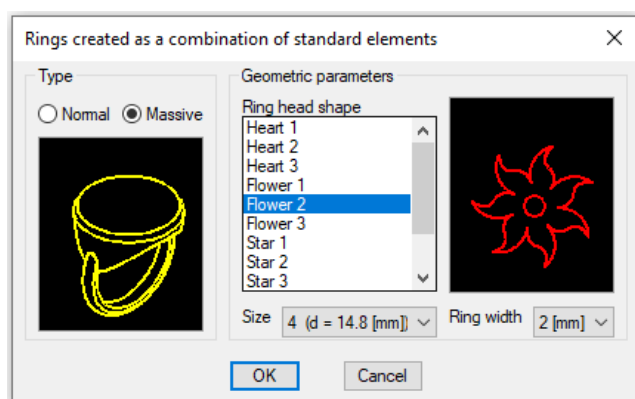
Стъпка 6 – Алгоритъм на програмата “rings”, представен на Фигура 5.



Фигура 5: Блок схема на алгоритъма на програмата “rings”/”steprings”.

Алгоритъмът на програмата “rings”, се състои от два режима: (1) автоматичният “rings” и (2) образователният “steprings”. Всеки от тях има две версии: (1) “standard”, използваща зададени геометрични блокове, и (2) “custom”, при която може да се използва предварително създаден орнамент в .stl файл. Програмата използва входна информация от потребителя, въведена чрез диалогови прозорци.

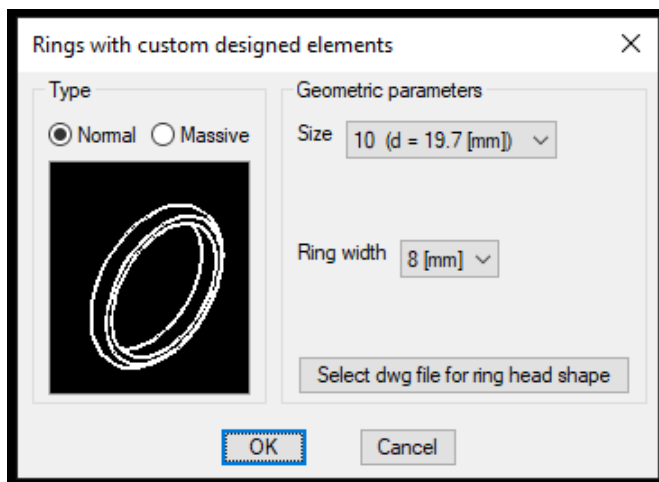
При включване на програмата в средата на AutoCAD, потребителят избира коя версия на програмата да достъпи. При стандартното изпълнение на „rings“, програмата преминава през множество стъпки, които са невидими за потребителя и завършва със създаден готов 3D модел, който комбинира параметрично зададени размери и типове на халката (“normal” – пръстен тип халка и “massive” – пръстен тип печат) с разнообразие от предварително създадени блокове за декорация. При този избор се отваря диалогов прозорец, показан на Фигура 6.



Фигура 6: Диалогов прозорец за задаване на типа, параметрите и формата на отделните елементи на пръстена.

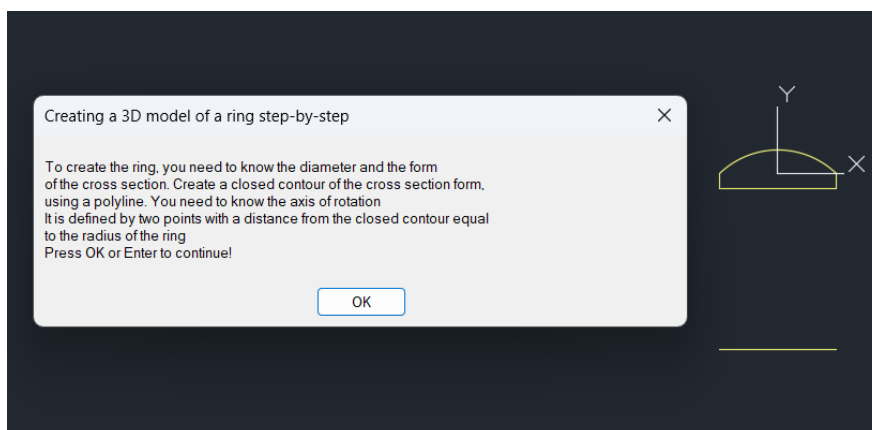
След натискане на “Ok” започва автоматичното създаване на 3D модел със зададените параметри.

Изборът на опцията “custom” извежда друг диалогов прозорец, показан на Фигура 7, в който отново могат да се изберат стандартни размери за халката, но има възможност да се посочи файл, в който потребителят е създал собствен персонализиран дизайн за орнамента на пръстена.



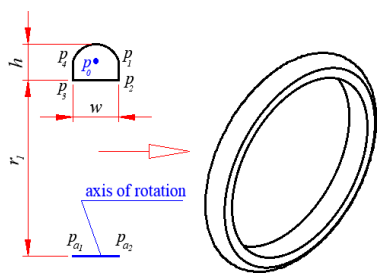
Фигура 7: Диалогов прозорец за създаване на пръстен във версия “custom” с предварително изготвен .stl файл с орнамент.

Когато програмата се стартира в режим стъпка по стъпка (“steprings”), изпълнението периодически се прекъсва, което позволява на потребителя да види какво се случва на всеки етап, както е илюстрирано на Фигура 8.



Фигура 8: Образователно съобщение към потребителя обясняващо принципите на базисното 3D моделиране в програмата AutoCAD.

По този начин потребителят се запознава с основните принципи на 3D моделирането на пръстен в AutoCAD. Първо се създава напречното сечение на халката. Използваната геометрия е илюстрирана на Фигура 9.



Фигура 9: Основна геометрия за 3D моделиране на халката на пръстен в програмата “rings”/ “steprings” в AutoCAD.

Изчисляват се координатите на точките, образуващи затворения контур P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , както и оста на въртене, дефинирана от точките P_{a1} , P_{a2} . Размерите на контурите се определят от параметрите, въведени в диалоговия прозорец на Фигура 6. Координатите на точките се преизчисляват спрямо координатна система с начало в точка P_0 . Важно е диаметърът на цилиндър 2 да бъде равен на размера d , който зависи от размера на пръстена. “ w ” представлява широчината на халката, “ h ” – дебелината, която зависи от размера и варира между 1.5 и 2 mm. Радиусът $r_1 = d/2$ зависи от размера на пръстена. Разстоянието $P_1P_2 = P_3P_4$ е константа (в този случай 0.8 mm), определена от прецизността на 3D принтера.

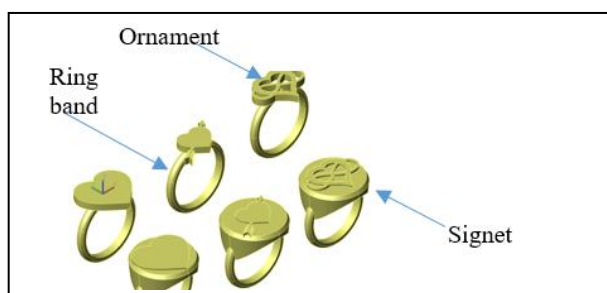
За получаване на тялото на масивната халка се използват булеви операции. Последователността на операциите е следната: цилиндър 2 се изважда от коничното тяло 1, за да се получи тяло 3, след което тяло 3 се обединява с халката 4.

Различните режими на програмата “rings” дават възможност на потребителя да създаде 3D модел, като развива уменията си на три нива:

1. Използване на програмата за създаване на пръстен с избран дизайн от предоставената библиотека;
2. Създаване на собствен дизайн на орнамент, използвайки халка със стандартни размери и форма;
3. Използване на възможностите на AutoCAD за създаване на напълно уникален дизайн.

Стъпка 9 – Създаване на 3D принтиран образователен обект

Резултатът от изпълнението на програмата е създаването на 3D модел и .stl файл, както е показано на Фигура 10.



Фигура 10: 3D модели на пръстени, създадени с програмата “rings”.

Стъпка 10 – Аprobация

Програмата “rings” е апробирана както в лабораторна среда в ИР-БАН, за да се установи успешната реализация на функционалността ѝ, така и в реална учебна среда.

- **Функционално изследване на програма „rings” в ИР-БАН**

Проведени са функционални експерименти с цел апробация на качеството на пръстените моделирани с програмата “rings”.

Разглеждат се няколко критерия: времето за отпечатване на един пръстен, качеството и здравината. Качеството на печата и здравината се оценяват субективно от един човек чрез въпросник по 5-степенна скала на Ликерт, при която 0 означава „напълно незадоволително“, а 5 – „отлично“. Скалата за оценка на качеството на 3D печата е както следва:

- 0 – Не може да бъде произведен с 3D принтер;*
- 1 – Наблюдават се значителни дефекти при сваляне на пръстена от работната платформа на 3D принтера;*
- 2 – Наблюдават се грапавини или видими неточности в изработката;*
- 3 – Наблюдават се малки неточности и прекъсвания в орнаментите;*
- 4 – Липсват прекъсвания, но все още се забелязват малки отклонения от модела;*
- 5 – Отпечатъкът изглежда точно като модела.*

Якостта на огъване на 3D принтираните пръстени също е тествана и оценена от един човек чрез многократно ръчно натискане с пръст със сила $F \approx 10 \text{ N}$. Скалата за оценка на здравината на 3D принтирания пръстен е следната:

- 0 – Пръстенът се поврежда при сваляне от работната платформа на 3D принтера;*
- 1 – Халката и част от орнаментите лесно се чупят при натиск с пръст;*
- 2 – Халката се деформира или чупи при многократно силно натискане;*
- 3 – Деформират се или се чупят само орнаментите върху пръстена;*
- 4 – Малка част от орнаментите се чупят при многократно силно натискане;*
- 5 – Няма видими повреди по пръстена.*

Получените резултати показват, че създадената програма е подходяща за автоматично генериране на 3D модели на пръстени чрез комбиниране на линейни параметри с предварително съществуващи блокове с орнаменти. Произведени са множество 3D принтирани пръстени, категоризирани според нивото им на сложност и размери. Техните качества са изследвани. Таблица 4 представя резултатите от изследването на качеството на 3D отпечатани пръстени с масивна основа на орнамента (пръстен тип печат), а Таблица 5 – на пръстени тип халка.

Извършеното функционално изследване потвърждава, че качеството на 3D отпечатаните пръстени намалява с увеличаване на сложността на формите и здравината на халката зависи от нейните размери. Въз основа на експериментите се счита, че пръстени с $w \geq 6 \text{ mm}$ са достатъчно здрави. В Таблица 5 пръстените, генерирани от програмата, които не са подходящи за FDM 3D принтираща технология, са отбелязани в жълто.

Таблица 4: Пръстени тип печат: време за принтиране, качество и якост на 3D моделите според сложността на орнамента

Орнамент	Номер	Форма	Време за печат [min]		Качество на 3D печата		Якост	
			w=6	w=8	w=6	w=8	w=6	w=8
Заоблен	1	Сърце	26	25	5	5	5	5
	2	Цвете	27	26	4	4	5	5
	3	Звезда	27	26	5	5	5	5
Остър	4	Сърце	27	26	4	4	5	5
	5	Цвете	28	27	4	4	5	5
	6	Звезда	28	27	5	5	5	5
Сложен	7	Сърце	28	27	3	3	5	5
	8	Цвете	29	28	3	3	5	5
	9	Звезда	26	26	5	5	5	5

Таблица 5: Пръстен тип халка: време за принтиране, качество и якост на 3D моделите в зависимост от сложността на орнамента.

Орнамент:	Но-мер	Форма	Време за печат [мин.]		Качество 3D печата		Якост	
			w=6	w=8	w=6	w=8	w=6	w=8
Заоблен	1	Сърце	18	18	5	5	5	5
	2	Цвете	20	21	4	4	4	5
	3	Звезда	19	20	5	5	4	5
Остър	4	Сърце	15	12	3	3	2	2
	5	Цвете	21	20	3	4	3	3
	6	Звезда	21	21	5	5	4	5
Сложен	7	Сърце	17	18	3	4	3	4
	8	Цвете	22	22	3	3	2	2
	9	Звезда	18	18	3	3	1	2

- **Изследване на програмата “rings” в реална училищна среда**

С цел реализация на стъпка 10 от подхода описан в Глава 3, и апробация на програмата “rings” е проведен научен експеримент в професионална гимназия в гр. Гоце Делчев, България през март 2025 от екип на ИР– БАН. Изследването е одобрено с Протокол № 10/12.03.2025 от Етична комисия за научни изследвания (ЕКНИ) към ИР-БАН.

Формирани са експериментална и контролна група от ученици, профилирани в направление „облекло“, които имат практически опит в изработването на на-
кити с различни техники на приложните изкуства.

Целта на експеримента е да се регистрира влиянието на независимата промен-
лива – иновативно учебно занятие с 3D принтиране върху зависимата промен-
лива: осреднената стойност на отговорите на учениците на тема „интерес към на-
уката“, по петстепенната скала на Ликерт, използвайки въпросник. Администри-
рания въпросник е даден в Приложение 3 на дисертационния труд.

Участващите ученици от 11ти клас (n=21) и 12ти клас (n=22) са разделени в
контролна и експериментална група. Разпределението в двете групи е извършено
въз основа на статистически анализ чрез t-тест на последните срочни оценки по
STEM предмети (математика, биология, физика, химия и информатика), предос-
тавени от учениците чрез онлайн въпросник представен в приложенията на пъл-
ния текст на дисертационния труд.

На контролната група е показан изработен от екипа на ИР-БАН кратък филм,
който представя техника в бижутерството наречена „изливане на метал по изгу-
бен восък“ (lost wax casting). На експерименталната група е показан същият филм,
но обогатен с ролята на 3D принтирането в традиционната техника. След прожек-
цията, на експерименталната група е представена презентация за използването на
3D печат в модата и изработката на обувки и аксесоари. Следващият етап от экс-
перименталното учебното занятие е въведение в 3D моделирането с AutoCAD и
практическа работа със създадената програма “rings”.

4.2. Резултати от изследването на програма “rings” в реална учи- лищна среда

В Таблица 6 са представени средните стойности, дадени от двете групи за
всеки елемент от променливата „интерес към науката“, преди и след занятието,
както и регистрираната разлика.

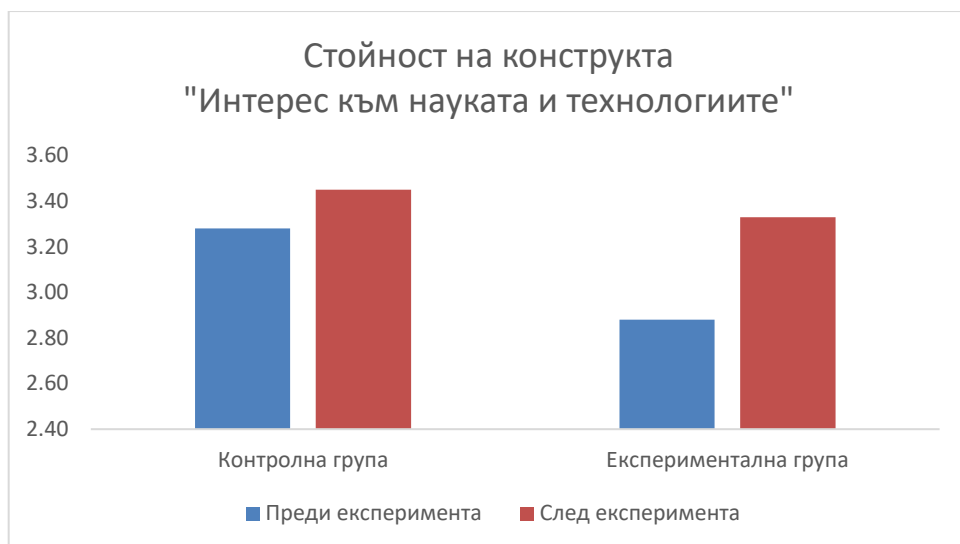
**Таблица 6: Сравнителни стойности на елементите на променливата „интерес към на-
уката“ преди и след иновативния урок с 3D принтиране.**

	Контролна група			Експериментална група		
	Преди	След	Промяна	Преди	След	Промяна
Осреднени общи данни	3,28	3,45	0,18	2,88	3,33	0,46
Мога да усвоя знания и умения в STEAM дисциплини.	3,71	3,44	-0,27	3,14	3,47	0,33
Мога да получа добра оценка по STEAM пред-мет.	3,90	3,67	-0,24	3,36	3,45	0,09

Стратегии, за да усвоявам STEAM знание.	3,29	3,06	-0,23	2,64	2,95	0,31
Познанията в STEAM ще ми дадат предимство в кариерата.	3,95	3,72	-0,23	2,77	3,35	0,58
Убеден/а съм, че мога да усвоя STEAM знания.	3,71	3,50	-0,21	2,82	3,75	0,93
STEAM - свързан с моя живот.	3,48	3,28	-0,20	4,05	3,30	-0,75
Любопитен/а съм към STEAM открития.	3,48	3,33	-0,14	2,82	3,75	0,93
Разбирането на STEAM ще ми бъде от полза в кариерата.	3,71	3,61	-0,10	2,68	3,10	0,42
Полагам/полагал/а съм усилия по STEAM предмет.	3,43	3,44	0,02	2,91	3,10	0,19
Изучаването на STEAM ще ми помогне да си намеря добра работа.	3,85	4,00	0,15	3,23	3,50	0,27
Да получа отлична оценка по STEAM.	3,55	3,72	0,17	3,10	3,60	0,50
Смятам, че ще използвам умения за разрешаване на STEAM проблеми в кариерата си.	3,10	3,28	0,18	2,41	2,90	0,49
Харесва ми да се справям по-добре от другите на тестовете по STEAM предмет.	3,86	4,06	0,20	3,27	3,25	-0,02
Наслаждавам се на изучаването на STEAM.	3,19	3,39	0,20	2,82	3,90	1,08
Изучаването на STEAM е интересно.	3,67	3,89	0,22	3,41	3,75	0,34
Подготвям се добре за тестовете и лабораторните упражнения по STEAM дисциплини.	2,95	3,22	0,27	2,45	3,05	0,60
Смятам, че кариерата ми ще бъде свързана по някакъв начин със STEAM.	2,95	3,22	0,27	2,41	3,00	0,59

Важно е да постигам високи резултати на тестовете и лабораторните упражнения по STEAM.	3,10	3,44	0,35	3,05	3,55	0,50
Отделям много време за изучаване на STEAM.	2,29	2,72	0,44	2,23	3,00	0,77
Ще се справя добре на тестовете по STEAM.	2,71	3,22	0,51	2,59	3,20	0,61
Ще се справя добре в лабораторните упражнения и проекти по STEAM.	2,48	3,00	0,52	2,43	3,25	0,82
Уча усърдно, за да усвоя STEAM знания.	2,52	3,11	0,59	2,32	3,15	0,83
Придобиването на STEAM знание прави живота ми по-смислен.	3,05	3,67	0,62	2,82	3,05	0,23
Вярвам, че мога да получа оценка „Отличен (6)“ по STEAM.	2,86	3,50	0,64	3,00	3,40	0,40
Замислям се за оценката, която ще получа по STEAM.	3,14	3,83	0,69	3,18	3,50	0,32

Стойностите на конструкта „интерес към науката и технологиите“ са получени като сума от средно аритметичните стойности на елементите изложени в Фигура 6. Промяната на тези стойности е изложена на трети ред от Таблица 6 и е илюстрирана графично на Фигура 11. Отбелязва се по-висок интерес към науката и технологиите след експерименталния урок, както в експерименталната, така и в контролната група. Конструктът е с по-голяма стойност при контролната група, но увеличението му е по-голямо при експерименталната. Това би могло да се обясни с възрастта и опита на учениците. Контролната група е съставена от ученици в 12ти клас. Може да се заключи, че образователна дейност с 3D принтиране и моделиране, адаптирана за специфичните интереси на класа, може да повиши стойностите на конструкта „интерес към науката и технологиите“ дори за ученици с по-ниско академично ниво.



Фигура 11: Стойност на променливата – конструкта „интерес към науката и технологиите“, преди и след експеримента.

4.3. Изводи от четвърта глава

В тази глава е извършено следното:

Разработена е оригинална програма с среда на AutoCAD за автоматизирано и персонализирано 3D моделиране на пръстени с възможност за директна подготовка за 3D печат, която намалява когнитивната бариера при усвояване на сложната система за компютърно моделиране. Програмата е създадена на базата на подхода, описан в Глава 3. Реализиран е диференциран интерфейс с два режима на работа – автоматизиран (“rings”) и образователен (“steprings”), позволяващ плавен преход от готово решение към активно индивидуално конструиране. Експериментално е изследвана зависимостта между геометрична сложност, време за печат, качество и здравина на 3D моделите реализирани посредством програмата. Чрез контролиран експеримент в гимназиална паралелка, профилирана в изкуства, е установено положително влияние на разработения софтуер върху мотивацията и интереса на учениците от хуманитарни и артистични профили към научно-технологични дисциплини. Може да се заключи, че използваната програма за автоматично 3D моделиране на пръстени е полезен образователен ресурс за STEAM занятие, което балансирано интегрира изкуство и технологии.

V. ГЛАВА ПЕТА: Разработка на 3D-принтирано помощно устройство за писане (ПУП)

В тази глава е представен процесът на създаване и тестване на програма за персонализирано 3D моделиране на ПУП за ученици с нарушения във фината моторика. Използван е подходът разработен в Глава 3.

5.1. Разработка на програмата “pinky”

Стъпка 1: Проучване на съществуващи решения

През януари 2025 г. е проведено анкетно проучване с цел изследване на ефективността на съществуващо помощно устройство за писане (ПУП1а) за ученици с нарушения във фината моторика, илюстрирано на Фигура 12. Файловете за 3D принтиране на устройството са предоставени от потребител Justin Sims представител на Louisiana Accessible Education Materials в платформата Thingiverse за свободно споделени .stl файлове.



Фигура 12: Помощно устройство за писане за ученици с нарушения във фината моторика ПУП1а) [46], използвано в дневен център за деца с увреждания в гр. София за една година, март 2025 - март 2026.

Анкетното проучване е реализирано чрез въпросник, представен в приложенията на пълния текст на дисертационния труд. Той е администриран сред 36 български специалисти, работещи с лица със СОП, включително разстройство от аутистичния спектър (РАС), практикуращи като логопеди, психолози, социални работници, специални педагози, експерти по ИКТ и 3D принтиране, инженери и изследователи в това направление. Изследването е одобрено от Етична комисия за научни изследвания (ЕКНИ) към Институт по роботика - БАН с Протокол № 8/05.02.2025 г.

Анализът на въпросниците показва, че най-важният сред елементите, които съставляват конструкта „удовлетвореност“ от асистивното устройство, е „Отговор на потребностите на лицето с РАС“ (посочено 25 пъти, 25%), следвано от

„Лесна употреба“ с 24 посочвания и „Безопасност“ с 19 посочвания. Устройството е оценено като по-безопасно (4,58) и по-издръжливо (4,44) отколкото ефективно (3,83).

Стъпка 2: Дефиниране на функционални изисквания

Установява се, че персонализацията спрямо индивидуалните предпочитания на потребителя пряко влияят върху ефективността на устройството. Изследвани са функционалните изисквания към такива ПУП, дефинирани в съществуващата научна литература. Такива са формата и размера на устройството, аксиалните ограничения на захвата и индивидуалните предпочитания в дизайна, като цвят, елементи, текстура и предпочитано средство за писане.

Стъпка 3: Оценка на съществуващите 3D модели

На база на проучването на съществуващите ПУП и дефинирането на функционални изисквания, е направена оценка на съществуващия модел ПУП1 а). Ниската степен на ефективност, с която е оценено устройството най-вероятно се дължи на липсата на персонализация и адаптация към индивидуалните нужди на потребителя. Високата оценка за безопасност и издръжливост се дължи на минималистичния дизайн и използвания материал.

Сравнително ниската оценка на ефективността на устройството може да бъде обяснена със следните фактори:

- Аксиалните ограничения не са персонализирани и има голяма вероятност да не пасват на индивидуалния захват.
- Дължината на средството за писане е прекалено голяма.

С цел повишаване на ефективността на устройството и с оглед на изложените изводи, се констатира необходимостта подобреното помощно устройство за писане (ПУП2) да реализира следните подобрения:

- Повишаване на степента, в която устройството отговаря на нуждите на лицето със СОП чрез персонализация на аксиалното ограничение.
- Подобряване на дизайна на ПУП1а) чрез повишаване на здравината.
- Разработка и изследване на втори вид минималистичен дизайн на ПУП1, наречен ПУП1 б), без аксиално ограничение;

Стъпка 3 (втора итерация): Оценка на съществуващите 3D модели

ПУП1 а) е 3D принтирано в ИР-БАН и предоставено на дневен център за работа с деца със СОП с цел валидиране в реална среда и получаване на допълнителна обратна връзка. ПУП1 б) е тествано функционално в ИР-БАН от дете с лява хемипареза. Получената обратна връзка е основана на поведенчески наблюдения и може да бъде обобщена както следва:

- ПУП 1 а) се оценява като удобно средство за писане.
- Второто аксиално ограничение при ПУП1а) не се използва в повечето случаи, като се прилага единствено ограничението за палеца – наблюдение, консистентно както с резултатите от изследването в дневния център, така и с тези в ИР-БАН.

При използване на ПУП1а) две деца с ДЦП демонстрират повишена мотивация за изпълнение на задачи, както и по-голяма точност и повтаряемост при писане. Въз основа на проведената апробация се идентифицират следните специфики:

- При модела ПУП1б), поради липсата на аксиално ограничение на палеца, се документират прояви на дискомфорт и болка в раменния пояс. Изследванията са прекратени своевременно и дизайнът ПУП1б) е отстранен от процеса на итерация.
- При тестването в центъра за работа с деца със СОП е диагностициран структурен дефект в механизма за захващане на пишещото средство, което налага повишаване на конструктивната здравина и ефективността на закрепването.

Стъпка 5: Избор на метод за проектиране съвместно с потребителя

Прилагайки метода за проектиране съвместно с потребителя, се създава ново ПУП, наречено ПУП2, с цел повишаване на ефективността. Изследването е одобрено от Етична комисия за научни изследвания (ЕКНИ) към ИР-БАН с Протокол № 1/25.03.2026 г. Използваната геометрия е базирана на съществуващото асистивно устройство за писане ПУП1. Сферичната форма е запазена, за да се използва предимството на минималистичния дизайн.

С цел регистриране на специфичния атипичен захват на всяко дете, е моделиран глинени прототип с форма наподобяваща ПУП 1а). След изсъхване на прототипа, специфичните за всяко дете параметри се снемат по два начина – (1) 3D сканиране без допълнително обратно инженерство и (2) ръчно измерване с шублер.

Стъпка 6: Алгоритъм за адаптация

Изследвани са три метода за адаптация към потребител и средство за писане, които са 3D сканиране, ръчно 3D моделиране в AutoCAD и автоматизирано 3D моделиране.

Извършено е пилотно изследване с 1 участник на 12 г. с хемипареза на лявата ръка в следствие на ДЦП.

Стъпка 7: Дефиниране на параметри

Заложените в програмата входни данни са илюстрирани на Таблица 7.

Таблица 7: Входни данни за „pinky”, програма за автоматично 3D моделиране на ПУП в AutoCAD.

Входни данни	Цел	Диапазон / Граници на валидация (mm)	Данни за Участник1 в пилотото изследване
Диаметър на сферата D	Размер на помощното устройство за писане	$45 < D < 85$	60
Радиус R1	Аксиално ограничение1	$5 < R1 < 18$	12
Радиус R2	Аксиално ограничение2	$5 < R2 < 18$	10
Разстояние d1	Дълбочина на аксиалното ограничение1	$0 < d1 < R1$	2
Разстояние d2	Дълбочина на аксиалното ограничение2	$0 < d2 < R2$	8
Ъгъл a1	Завъртане на цилиндъра с радиус R1	задава се в градуси	68
Ъгъл a2	Завъртане на цилиндъра с радиус R2	задава се в градуси	125
Ъгъл a3	Завъртане на цилиндъра (с радиус R2) около хоризонтална ос, която преминава през центъра на сферата	задава се в градуси	-75

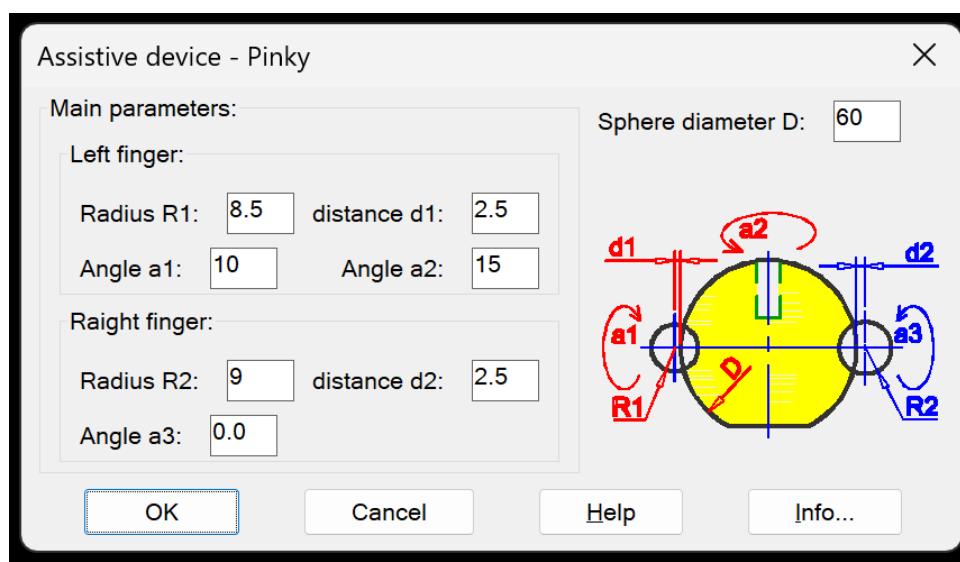
Базовият геометричен параметър на ПУП е диаметърът на сферата, означен в диалоговия прозорец като “Sphere diameter D”. Аксиалното ограничение на левия пръст е означено с наименованието Radius R1 и представлява радиус на изрязване в което се поставя пръста. Променя се в граници $5 < R1 < 18$ [mm]. Програмата създава цилиндър с радиус R1, с който да се изреже аксиалното ограничение. Разстоянието d1 определя дълбочината на аксиалното ограничение. В програмата е заложено да се изменя в границите: $0 < d1 < R1$ [mm]. Ъгълът a1 позволява програмата да завърти цилиндъра (с радиус R1) около хоризонтална ос, която преминава през центъра на сферата. Всички ъгли са зададени в градуси. Ъгълът a2 позволява програмата да завърти цилиндъра (с радиус R1) около вертикална ос, която преминава през центъра на сферата. Тези два ъгъла са важни, защото позволяват изрязването да се адаптира опитно, така, че устройството да е възможно най-персонализирано и удобно за захващане. Радиус R2 е радиус на аксиалното ограничение за десния пръст (т.е. палеца на лявата ръка). Променя се в граници $5 < R2 < 18$ [mm]. Програмата създава цилиндър с радиус R2, с който да се изреже аксиалното ограничение. Разстоянието d2 определя дълбочината на изрязването от втория цилиндър с радиус R2. В програмата е заложено да се изменя в границите: $0 < d2 < R2$ [mm]. Ъгълът a3 позволява програмата да завърти цилиндъра (с радиус R2) около хоризонтална ос, която преминава през центъра на сферата. С цел по-голяма степен на персонализация към индивидуалния захват на потребителя, входните данни се нанасят в поле за свободно въвеждане на текст, в което потребителят може да заложи точните си данни. В случай, че е необходимо аксиално

ограничение само за един пръст, се нанася минимален радиус (напр. 0,01мм) за деактивиране на втория цилиндър.

Стъпка 8: Програма за автоматизирано 3D моделиране

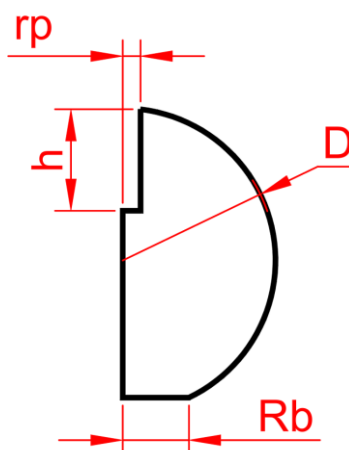
Програмата „pinky” чертае ПУП2 като сфера, която има отвор за поставяне на химикал, молив или инструмент и равна основа, която улеснява изграждането слой по слой и закрепването на билдинг платформата. Два цилиндъра с радиуси R1 и R2 изрязват отпечатьци върху сферата, които представляват аксиалните ограничения на два пръста и подпомагат контрола на захвата и удобството при писане.

Програмата комуникира с потребителя чрез диалогови прозорци. Стартирането се задава в командния ред на AutoCAD с набиране на функцията „pinky_d”. Отваря се диалогов прозорец, в който потребителя задава входните параметри, както е илюстрирано на Фигура 13.



Фигура 13: Диалогов прозорец за входни данни в програмата „pinky_d”

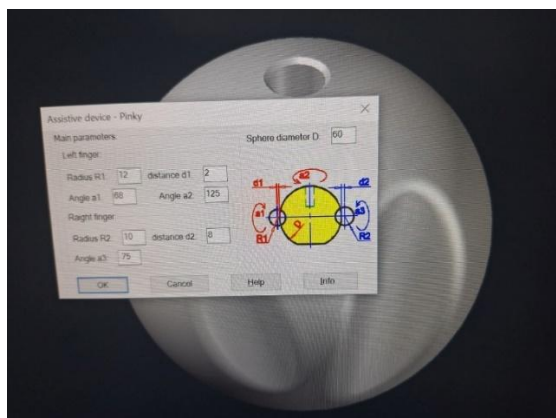
След коректно попълване на необходимите размери програмата преминава към създаване на необходимата геометрия. Формата и параметричните размери са дадени на Фигура 14.



Фигура 14: Базова геометрия на ПУП2

Размерът R_b определя площта на основата на сферичното тяло и е зададен като константа $R_b=13[\text{mm}]$. Той е важен за изработване на тялото с 3D принтер. Определя площта на допир с платформата за изграждане на принтера. Височината на отвора за средство за писане h е прието да е $20[\text{mm}]$. Тя е технологично важна за закрепване на химикал, молив или друг инструмент. Радиуса r_b се променя от програмата в зависимост от адаптиращото тяло за захващане на химикал или инструмент. Основното тяло се получава след завъртане на геометрията от Фигура 13 около вертикална ос. След това програмата построява двата цилиндъра.

Готовият модел на ПУП2, генериран от програмата “pinku”, е представен на Фигура 15.



Фигура 15: 3D модел на ПУП2, създаден с програмата “pinku”



Фигура 16: Отпечатан 3D модел на ПУП2, създаден с програмата “pinku”

В последното итеративно подобрене на програмата е заложен нов геометричен блок за захващане на средството за писане, за да се преодолеят регистрираните ограничения в здравината. 3D отпечатаното устройство е илюстрирано на Фигура 16.

5.2. Изводи от пета глава

Проведено е изследване на ефективността на 3D отпечатани ПУП за ученици със СОП. Направено е сравнително проучване на съществуващи методи за създаването им, персонализация към потребителя и снемане на индивидуални размери. Определени са основните геометрични параметри, които оказват най-съществено влияние върху ергономичността и удобството при използването на ПУП.

Проектиран е иновативен дизайн на персонализирано асистивно устройство за писане (ПУП2), който надгражда съществуващите подобни средства по отношение на персонализация и универсализация. Разработена е програмата “pinky” за неговото автоматизирано 3D моделиране в средата на AutoCAD. Създадената програма е базирана на авторския подход, описан в Глава 3.

С описаните разработки се създава възможност за бързо и сравнително лесно 3D моделиране на индивидуализирани помощни устройства, адаптирани към конкретните моторни особености на потребителя. Това разширява достъпа до АТ и създава предпоставки такива устройства да бъдат използвани не само от специалисти, но и от самите лица със СОП или техните семейства. Достъпната цена на FDA 3D принтерите, филаментите и възможността да се използва софтуерът AutoCAD безплатно от ученици, улесняват внедряването на програмата “pinky” в лабораторна, училищна и домашна среда.

Заклучение

Представеният дисертационен труд обхваща (1) теоретично проучване на обектната област в съществуващата научна литература, описано в Глава 1; (2) разработка и експериментална валидация на протокол за интегриране на 3D принтиране, ИИ и роботика в съвременното STEAM образование, описан в Глава 2; (3) подход за автоматизирано създаване на 3D отпечатани персонализирани модели за образователни цели, описан в Глава 3; (4) програма за автоматизирано 3D моделиране в AutoCAD за целите на профилираното артистично образование, описана в Глава 4; (5) програма за автоматизирано 3D моделиране в AutoCAD за целите на образованието на ученици със СОП, описана в Глава 5.

Чрез разработените протокол и подход са преодолени съществени ограничения, свързани с основните бариери при използването на технологията за 3D печат в образованието и недостига на нискобюджетни персонализирани асистивни технологии за ученици със СОП.

Перспективи за бъдещи изследвания

Разработените в дисертационния труд протокол, подход и две програми за автоматизирано 3D моделиране на образователни предмети са с големи перспективи за бъдещо развитие и приложение в следните насоки:

1. Протоколът за провеждане на STEAM учебно занимание може да бъде тестван с по-голям брой участници, в различни дисциплини и за по-дълъг период от време.
2. Подходът за създаване и приложение на 3D отпечатани устройства, предназначени за образователни цели може да бъде апробиран в разработката на програми за автоматизирано моделиране в други CAD среди, различни от AutoCAD.
3. Програмата “rings”, описана в Глава 4 има потенциал за надграждане посредством дългосрочни количествени и качествени наблюдения, които да регистрират дали и как придобитият интерес и мотивация за работа с технологии и наука се променя във времето. Чрез поведенчески наблюдения на процеса на работа с програмата, биха могли да се регистрират спецификите на творческия процес на учениците по изкуства, когато са включени технологии.
4. Програмата “pinku” предоставя редица възможности за подобрения в интерфейса и добавяне на нови функционалности. Създадените с нея ПУП могат да бъдат интегрирани с други асистивни устройства и технологии, с цел по-голяма ефективност в ерготерапията на лица със СОП.
5. Разработените AutoCAD програми могат да бъдат усъвършенствани посредством добавянето на функционалности като:
 - Допълнителни геометрични блокове, с които да се автоматизира 3D моделирането на по-голям брой образователни предмети;
 - Запамяване на моделираните предмети по дата и име на потребител;
 - Добавяне на допълнителни библиотеки с декоративни елементи и текстури.

Приноси на дисертационния труд

Взимайки предвид работата по дисертацията и резултатите, получени от проведените изследвания и представени в дисертационния труд, могат да се формулират следните приноси:

Научно-приложни приноси

1. Разработен е протокол за провеждане на образователно STEAM занимание, който включва използване на ИИ в помощ на учителя, 3D принтирани образователни макети и сценарии за работа NAO. Протоколът е валидиран по време на урок по физика в гимназиален етап на общообразователно училище. Изследван е ефекта от приложението на протокола върху ангажираността на учениците.
2. Разработен е подход за автоматизирано създаване на 3D принтирани персонализирани модели предназначени за образователни цели. Подходът включва автоматизирано генериране на 3D модели в средата на AutoCAD и последващо изработване с 3D принтер. Алгоритъмът търси оптимални параметри в три направления: адаптация към потребител; адаптация към инструмент и визуален образователен ефект.

Приложни приноси

1. Създадена е програма за автоматично 3D моделиране на пръстени в AutoCAD среда. Програмата позволява персонализиране на геометрични параметри и автоматично поставяне на декоративни елементи избрани от библиотека. Програмата работи в два варианта. Един за генериране на 3D модели и втори, който постъпково демонстрира начина на създаване на моделите, с образователна цел.
2. Изследвани са свойствата и качествата на реални 3D принтирани модели получени от предложената програма.
3. Проведено е пилотно приложение на разработения софтуер за автоматизирано създаване на 3D принтирани пръстени в реален учебен процес. Резултатите са анализирани и систематизирани.
4. Проведено е изследване на ефективността на 3D принтирани помощни устройства за писане за ученици със СОП. Анализирани са различни подходи за създаване на персонализирани помощни устройства. Изследвани са методи за адаптация и вземане на индивидуални размери. Въз основа на това са определени основните геометрични параметри, които оказват най-съществено влияние върху ергономичността и удобството при ползването им.
5. Разработена е програма за автоматизирано създаване на 3D модел на персонализирано устройство за писане за ученици със затруднения във фината моторика.

Публикации

Резултатите в дисертационния труд са публикувани в 5 статии, които са докладвани на международни конференции и са издадени в томовете на тези конференции. Една от тях е с SJR, две са публикувани в Scopus/ Web of science и две – с ISSN/ ISBN. Към май 2026г са забелязани 5 бр. цитирания.

Публикации с SJR:

Kostova, B., Georgieva-Tsaneva, G., Chavdarov, I. and Kostova, S., 2025, April. Exploring 3D Printing as an Assistive Technology for Learners with Autism Spectrum Disorder: A Comprehensive Review and Analysis of Scientific Studies. In International Conference on Digital Transformation in Education and Artificial Intelligence Application (pp. 27-51). Cham: Springer Nature Switzerland, SJR 0.182, Q3 https://doi.org/10.1007/978-3-032-02801-3_3

Публикации в Scopus, Web of science:

Chavdarov, I., Kostova, B. and Georgieva-Tsaneva, G., 2024, September. Application Development in AutoCAD Environment for Modeling 3D Printed Souvenirs Targeting STEAM Education. In 2024 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) (pp. 1-6). IEEE;

Kostova, B., Chavdarov, I., Georgieva-Tsaneva, G., Kostova, S. and Krastev, A., 2024, September. Integrating Creativity in a STEAM Physics Lesson by using 3D Printing and a Humanoid Robot NAO. In 2024 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) (pp. 1-6). IEEE;

Публикации с ISSN/ ISBN:

Kostova, B., 2025. Increasing science and technology motivation in fashion students through educational activities with 3D printing. Science Series-Innovative STEAM Education, STEAM Edu conference, Bulgaria, ISSN:2683-1333, 38;

Borislava Kostova, Galya Georgieva–Tsaneva, Ivan Chavdarov, Snezhana Kostova, Anna Lekova, Paulina Tsvetkova. Evaluation of 3D Printed Device to Support Fine Motor Skills of Children with ASD. AAATE - Association for the advancement of assistive technology in Europe, 3, 97, 2025, ISBN:978-9925-604-07-4, 236;

Списък на забелязани цитирания

2 бр цитирания на Kostova, B., Chavdarov, I., Georgieva-Tsaneva, G., Kostova, S. and Krastev, A., 2024, September. Integrating Creativity in a STEAM Physics Lesson by using 3D Printing and a Humanoid Robot NAO. In 2024 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) (pp. 1-6). IEEE.

- Ordoumpozanis, K., Konstantakis, M., Zoi, S. and Caridakis, G., 2025, September. Generative AI: A SySTEAMatic Review of Related Interfaces and Interactions. In Proceedings of the 3rd International Conference of the ACM Greek SIGCHI Chapter (pp. 39-47).
- Guvendiren, M., 2026. Implementing 3D Printing in Engineering Education: Development and Assessment of an Integrated Lecture–Laboratory Course.

3 бр. цитирания на Chavdarov, I., Kostova, B. and Georgieva-Tsaneva, G., 2024, September. Application Development in AutoCAD Environment for Modeling 3D Printed Souvenirs Targeting STEAM Education. In 2024 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) (pp. 1-6). IEEE;

- Chehlarova, N., Chehlarova, K. and Gecheva, N., 2025. STEAM Workshops with a 3D Pen. ПЕДАГОГИЧЕСКИ ФОРУМ Учредители: Trakia University, 13(1), pp.41-49.
- Chehlarova, N., 2025. 3D Printed Educational Resources for Studying Percentages by People with Visual Impairments. *Педагогически форум*, (2), pp.97-106.
- Chehlarova, N., Chehlarova, K. and Gecheva, N., 2025. Application of 3D Printing in the Study of Quadrilaterals in 5th Grade. *Science Series-Innovative STEM Education*, 7, pp.152-157.

16р цитирания на Kostova, B., 2024. The Use of 3D Printing Technology in Education for Students with Autism Spectrum Disorder–Assessment of Good Practices. *Science Series-Innovative STEM Education*, 6, pp.173-181.

- Chehlarova, N., Chehlarova, K. and Gecheva, N., 2025. Application of 3D Printing in the Study of Quadrilaterals in 5th Grade. *Science Series-Innovative STEM Education*, 7, pp.152-157.

Благодарности

С най-голяма признателност, благодаря на научните си ръководители проф. д-р Иван Чавдаров и доц. д.н. Галя Георгиева–Цанева за експертните насоки в процеса на разработване на дисертацията, предоставените ресурси и професионалната подкрепа в рамките на докторантското ми обучение. Сърдечно благодаря на всички колеги от секциите, ръководството и администрацията на Институт по роботика – БАН за споделения опит, готовността за съдействие и колегиалното отношение. Не на последно място, изказвам благодарност на прекрасното си семейство за вдъхновението, мотивацията и подкрепата.

Сърдечно благодаря на учителите и учениците, участвали в експерименталните дейности за доверието и ентусиазма при апробацията на разработените протокол, подход и програми в реална образователна среда. Тяхната обратна връзка и уверение за полезността на описаните разработки ми дадоха кураж да преодолее срещаните предизвикателства.