

АМСИЛАСОЗИИ МАТЕМАТИКӢ ВА ТАСНИФОТИ АЛГОРИТМИИ ХАТОИҲО ДАР ПЛАТФОРМАИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИИ ОМУӢЗИШИ БАРНОМАСОЗӢ

М.К. Муродов

Донишгоҳи давлатии ҳуқуқ, бизнес ва сиёсати Тоҷикистон, ш. Хучанд, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола амсилаи математикӣ ва алгоритмӣ платформаи интеллектуалии санҷиш ва омузиши барномасозӣ пешниҳод ва асоснок карда мешавад. Равиши пешниҳодшуда коди донишҷӯро ҳамчун сохтори дискретӣ моделсозӣ намуда, дар асоси таҳлили ҷузъӣ ва сохторӣ хатоҳои ошкор ва тасниф мекунад. Барои таснифи хатоҳои синфҳои асосӣ, яъне синтаксисӣ, мантикӣ, сохторӣ ва параметрӣ ё самаранокӣ ҷудо карда шуда, қарор дар асоси маҷмуи нишонаҳо ва параметрҳои код қабул мегардад. Механизми бозгашт ва тавсияҳои фардӣ дар шакли равиши давравӣ татбиқ шуда, имкон медиҳад дар ҳар такроршавӣ тавсияҳо бо назардошти таърихи омузиш ва динамикаи пешрафти донишҷӯ дақиқтар гарданд. Барои баҳогузори самаранокии омузиш нишондиҳандаи интегралӣ пешниҳод мешавад, ки қоҳиши нисбии шумораи хатоҳои нисбат ба ҳаҷми код дар такроршавии пайдарпай инъикос менамояд. Натиҷаҳои озмоиши таҷрибавӣ бо иштироки 42 нафар донишҷӯ самаранокии равиши пешниҳодшударо тасдиқ намуданд. Натиҷаҳои таҳлили назариявӣ нишон медиҳанд, ки ҳамгирони таснифи хатоҳои таҳлили сохторӣ ва тавсиягари мутобикшаванда метавонад сифати омузиши барномасозиро баланд бардорад ва барои рушди муҳитҳои омузиши интеллектуалӣ заминаи илмӣ фароҳам оварад.

Калидвожаҳо: барномасозӣ, муҳити омузиши интеллектуалӣ, таснифи хатоҳои таҳлили сохторӣ код, амсиласозии математикӣ, алгоритмҳои мутобикшаванда, механизми бозгашт, тавсияҳои фардӣ.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОШИБОК В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЕ ОБУЧЕНИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЮ

М.К. Муродов

Таджикский государственный университет права, бизнеса и политики, г. Худжанд, Республика Таджикистан

В статье представлены и обоснованы математическая и алгоритмическая модели интеллектуальной платформы контроля и обучения программированию. Предложенный подход рассматривает программный код студента как дискретную структуру и на основе поэлементного и структурного анализа выявляет и классифицирует ошибки. Для классификации выделены основные классы ошибок: синтаксические, логические, структурные и параметрические (или ошибки эффективности). Принятие решения осуществляется на основе совокупности признаков и параметров кода. Механизм обратной связи и персонализированных рекомендаций реализован в виде итерационного процесса, что позволяет на каждой интеграции уточнять рекомендации с учетом истории обучения и динамики прогресса обучающегося. Для оценки эффективности обучения предложен интегральный показатель. Апробация предложенного подхода, проведенная на выборке из 42 студентов, подтвердила его высокую эффективность. Результаты теоретического анализа показывают, что интеграция классификации ошибок, структурного анализа и адаптивной рекомендательной системы способствует повышению качества обучения программированию и создает научную основу для развития интеллектуальных образовательных сред.

Ключевые слова: программирование, интеллектуальная образовательная среда, классификация ошибок, структурный анализ кода, математическое моделирование, адаптивные алгоритмы, механизм обратной связи, персонализированные рекомендации.

MATHEMATICAL MODELING AND ALGORITHMIC CLASSIFICATION OF ERRORS IN AN INTELLIGENT PROGRAMMING EDUCATION PLATFORM

М.К. Муродов

Tajik State University of Law, Business and Politics, Khujand, Republic of Tajikistan

The article presents and substantiates the mathematical and algorithmic models of an intelligent platform for assessing and teaching programming. The proposed approach models a student's code as a discrete structure and identifies and classifies errors based on component-wise and structural analysis. The main classes of errors are distinguished as syntactic, logical, structural, and parametric (or efficiency-related) errors. Decision-making is carried out on the basis of a set of features and parameters extracted from the code. The feedback mechanism and personalized recommendations are implemented as an iterative process, which allows refining recommendations at each iteration by taking into account the learning history and the dynamics of the student's progress. To evaluate learning effectiveness. Experimental validation of the proposed method, performed with 42 student participants, confirmed its significant effectiveness. The results of the theoretical analysis show that the integration of error classification, structural code analysis, and an adaptive recommendation mechanism can improve the quality of programming education and provide a scientific foundation for the development of intelligent learning environments.

Keywords: programming, intelligent learning environment, error classification, structural code analysis, mathematical modeling, adaptive algorithms, feedback mechanism, personalized recommendations.

Муқаддима (Introduction)

Дар даҳсолаҳои охир рушди босуръати технологияҳои рақамӣ мазмун, воситаҳо ва шаклҳои татбиқи таълимиро тағйир дод ва ба тавсеаи равишҳои нав дар ташкил ва идоракунии омузиш замина фароҳам овард. Дар ин шароит муҳитҳои омузиши интеллектуалӣ нақши калидӣ мегиранд, зеро онҳо бояд хусусиятҳои инфиродии донишҷӯ, аз ҷумла сатҳи омодагӣ, тарзи азҳудкунӣ ва маҷмуи хатоҳои такроршавандаро ба назар гирифта, таълимиро мутобик созанд. Муҳимияти масъала дар омузиши барномасозӣ боз ҳам бештар зоҳир мешавад, чунки натиҷаи устувор танҳо бо аз ёд кардани қоидаҳои синтаксис таъмин намегардад ва фаҳмиши мантиқ, сохтор ва алгоритмҳои сохтани барнома талаб карда мешавад [1]. Барномасозӣ ҳамчун яке аз самтҳои асосии таълими техника ба эҳтиёҷоти иқтисоди рақамӣ ва соҳаҳои вобаста ба он мустақиман пайваст аст ва маҳз ҳамин омил талаботро ба

сатҳи касбии хатмкунандагон боло мебарад. Бо вучуди ин, дар амал санчиш ва баҳогузори корҳои амалии донишҷӯён бештар ба арзёбии дастии омӯзгор таъя мекунад. Ин ҳолат ҳам сарфи вақти зиёд талаб мекунад ва ҳам имкони назорати пурраро маҳдуд месозад. Дар шароити синфи сершумор санчиши як кори амалӣ то 15–20 дақиқа тӯл мекашад, ки дар натиҷа алоқаи фаврӣ таъмин намешавад ва ислоҳи хатоҳо ба таъхир меафтад. Бинобар ин, зарурати истифодаи платформаҳои автоматикунонидашуда ва интеллектуалӣ барои санчиш, баҳогузори ва дастгирии омӯзиши барномасозӣ рӯз ба рӯз равшантар мегардад [2].

Барои пешниҳоди амсила ва ҳалли пешниҳодшаванда аввал лозим аст платформаҳои мавҷудай санчиши автоматикӣ код таҳлил шаванд, то имкониятҳо ва маҳдудиятҳои онҳо ба таври асоснок муайян гардад. Ҷадвали 1 натиҷаҳои таҳлили мазкурро ҷамъбаст менамояд.

Ҷадвали 1 – Таҳлили муқоисавии платформаҳои мавҷудай санчиши автоматикӣ коди забонҳои барномасозӣ

Table 1 – Comparative analysis of existing platforms for automated testing of programming-language code

Платформа	Таҳхиси хатоҳо (0–3)	Тавсияҳои фардӣ (0–3)	Таҳлили сохторӣ (0–3)	Шумораи забонҳои дастгиришаванда, адад
Codeforces	1	0	0	40
LeetCode	1	1	1	15
HackerRank	2	1	0	35
Codecademy	1	1	0	12
Платформаи пешниҳодшаванда	3	3	3	3

Ҷадвали арзёбӣ: 0 — хусусият вучуд надорад; 1 — дар сатҳи маҳдуд (бе мутобиқсозии динамики); 2 — амал мекунад, вале бе семантикаи амиқ; 3 — пурра ва бо алгоритми мутобиқшаванда. Манбаи додаҳо: дастурҳои расмӣи техникаи онлайнӣ платформаҳо (Codeforces.com, LeetCode.com, HackerRank.com, Codecademy.com), дар моҳҳои март–апрели 2026 ҷамъоварӣ шудаанд.

Шарҳи ҳолҳо дар ҷадвали поёни оварда шудааст. Шкалаи мазкур барои арзёбии дараҷаи татбиқи функцияҳои таҳлилшаванда дар платформаҳои муқоисашаванда истифода гардид.

Шарҳи ҳолҳо

Ҳол	Тавсиф
0	Хусусият мавҷуд нест
1	Амалисозии маҳдуд
2	Амалисозии қисман пурра
3	Амалисозии пурра ва интеллектуалӣ

Бо мақсади муқоисаи имкониятҳои платформаҳои омӯзиши барномасозӣ усули арзёбии бисёрмеъерӣ истифода гардид. Барои таҳлил чор хусусияти асосӣ интихоб карда шуданд: имконияти таҳхиси хатоҳо, мавҷудияти тавсияҳои омӯзишӣ, дастгирии механизмҳои мутобиқшавӣ ва қобилияти таҳлили сохторӣи код. Ин хусусиятҳо дар таҳқиқоти муосири соҳаи системаҳои интеллектуалии омӯзиш ҳамчун нишондиҳандаҳои калидии самаранокӣ эътироф мешаванд. Қимати «0» маънои пурра набудани хусусияти таҳлилшавандаро дорад. Қимати «1» ҳолатеро ифода менамояд, ки функция танҳо ба таври маҳдуд ё ғайримустақим амалӣ шудааст. Қимати «2» барои системаҳое истифода гардид, ки имконияти муайяни татбиқи функцияи мазкурро доранд, аммо сатҳи мутобиқшавӣ ва интеллектуалии онҳо маҳдуд мебошад. Қимати «3» танҳо ба он платформаҳо дода шуд, ки функцияи дахлдорро ба таври пурра, мутобиқшаванда ва бо истифодаи механизмҳои интеллектуалӣ амалӣ менамоянд.

Барои таъмини объективияти натиҷаҳо баҳодиҳӣ дар асоси таҳлили ҳуҷҷатҳои расмӣ, имкониятҳои функционалӣ ва хусусиятҳои техникаи платформаҳои мавриди омӯзиш анҷом дода шуд. Истифодаи меъёрҳои ягона имконият дод, ки натиҷаҳои муқоисавӣ бо дараҷаи баланди эътимоднокӣ ба даст оварда шаванд.

Интиҳоби меъёрҳои арзёбӣ тасодуфӣ нест. Имконияти таҳхиси хатоҳо сатҳи дастгирии раванди омӯзишро муайян менамояд. Механизми тавсияҳо қобилияти система барои пешниҳод намудани роҳҳои ислоҳи хатоҳоро инъикос мекунад. Мутобиқшавӣ нишон медиҳад, ки то кадом дараҷа муҳити таълимӣ метавонад ба хусусиятҳои инфиродии донишҷӯ мутобиқ гардад. Таҳлили сохторӣи код бошад, имконият медиҳад сифати алгоритм ва услуби барномасозии донишҷӯ

баҳогузорӣ карда шавад. Аз ин рӯ, маҷмуи меъёрҳои интихобшуда хусусиятҳои муҳимтарини системаҳои интеллектуалии омӯзиши барномасозиро фаро мегирад.

Натиҷаҳои ҷадвали 1 нишон медиҳанд, ки платформаҳои мавҷудаи санҷиши автоматикии код асосан ба тафтиши дурустии иҷроиши барнома тавассути тестҳо таъя мекунад. Аз ин рӯ, ташҳиси хатоҳои дар бисёр ҳолатҳо маҳдуд буда, бештар ба нишон додани “қабул шуд” ё “рад шуд” ва баъзе сабабҳои умумӣ, мисли хатои ҷавоб ё аз ҳад зиёд шудани вақт, оварда мерасонад. Ҳамзамон, имкониятҳои тавсияҳои фардӣ дар аксари платформаҳо пурра рушд наёфтаанд. Одатан тавсияҳо шакли умумӣ доранд ва камтар ба сатҳи омодагӣ ё хатоҳои такроршавандаи донишҷӯ мутобиқ мешаванд. Таҳлили сохтори код низ дар аксари ҳолатҳо дастгирӣ намешавад ё танҳо маҳдуд амалӣ мегардад, бинобар ин камбудҳои мантиқӣ ва сохторӣ на ҳамеша ошкор мешаванд [3].

Дар маҷмуъ, маълумоти ҷадвал зарурати пешниҳоди равиши навро асоснок мекунад, ки ташҳиси хатоҳои муфассалтар анҷом дода, таҳлили сохторӣ ва тавсияҳои фардиро барои дастгирии омӯзиш пурра ҷорӣ намояд.

Платформаи дар оянда пешниҳодшаванда на танҳо маҷмуи васеи имкониятҳои техникӣ ва функционалиро таъмин менамояд, балки ҳамчун муҳити омӯзиши мутобиқшаванда низ муаррифӣ мешавад, ки раванди омӯзишро ба хусусиятҳои инфиродии донишҷӯ мутобиқ мегардонад. Дар ин низом ташҳиси хатоҳои танҳо ба ошкор ва таснифи онҳо маҳдуд намешавад, балки таҳлили сабабҳои пайдоиш, муайян кардани робитаи хатоҳои бо унсурҳои алоҳидаи код ва арзёбии таъсири онҳо ба сохтори умумии барнома анҷом дода мешавад. Дар сатҳи амалӣ чунин таҳлил ба ҷудо намудани хатоҳои аз рӯи навъ, сатҳи таъсир ва манбаи эҳтимолии пайдоиш равона шуда, заминаи далелнок барои интихоби тавсияҳо фароҳам меорад [4].

Дар асоси натиҷаҳои таҳлил механизми алоқии фаврӣ ва тавсияҳои инфиродӣ татбиқ мегардад, ки бо сатҳи дониш, динамикаи пешрафт ва траекторияи омӯзиши донишҷӯ ҳамроҳ карда мешавад. Механизми мазкур на танҳо хатоиро нишон медиҳад, балки роҳи ислоҳро бо истифодаи ишораҳои методӣ, намунаҳои мувофиқ ва пайдарпайии амалҳо пешниҳод менамояд. Истифодаи амсилаҳои математикӣ ва алгоритмҳои таснифоти хатоҳои дар доираи равиши давравӣ имкон медиҳад, ки дар ҳар давр натиҷаҳои санҷиш, хусусияти хатоҳои такроршаванда ва сифати ҳалли пешниҳодшуда ҷамъбаст шуда, параметрҳои тавсия ва сатҳи душвории вазифаҳои минбаъда мутобиқ гарданд. Бо ин роҳ ҳам сатҳи омодагии донишҷӯ ва ҳам сифати коди воридшуда ба таври пайваста беҳтар мешавад. Маҳз чунин имкониятҳо, ки тибқи маълумоти ҷадвали 1 барои аксари платформаҳои мавҷуда хос нестанд, низоми пешниҳодшударо ба муҳити воқеан интеллектуалӣ ва самаранок барои ташаккули малакаҳои барномасозӣ табдил медиҳанд.

Дар солҳои охир рушди босуръати технологияҳои зеҳни сунъӣ ба пайдоиши насли нави системаҳои интеллектуалии омӯзишӣ оварда расонид. Тадқиқотҳои солҳои 2021–2025 нишон медиҳанд, ки истифодаи алгоритмҳои омӯзиши мошинӣ, таҳлили худкори коди барномавӣ ва механизмҳои мутобиқшавандаи тавсияҳо метавонад сифати омӯзиши барномасозиро ба таври назаррас баланд бардорад.

Таҳлили адабиёти илмӣ солҳои охир нишон медиҳад, ки диққати муҳаққиқон бештар ба таҳияи воситаҳои баҳодиҳии худкори коди барномавӣ, системаҳои интеллектуалии омӯзишӣ ва муҳитҳои мутобиқшавандаи таълим дар асоси зеҳни сунъӣ равона шудааст. Натиҷаҳои бадастомада собит менамоянд, ки истифодаи чунин технологияҳо имконият медиҳад раванди омӯзиш инфиродӣ гардонида шуда, хатоҳои барномавӣ сари вақт ошкор ва барои ҳар як донишҷӯ тавсияҳои мутобиқ ба сатҳи дониш ва хусусиятҳои омӯзишии ӯ пешниҳод карда шаванд.

Бо вуҷуди пешрафтҳои назаррас, таҳлили адабиёти илмӣ нишон медиҳад, ки қисми зиёди системаҳои мавҷуда асосан ба санҷиши дурустии натиҷаи ниҳии барнома нигаронида шудаанд. Дар аксари ҳолатҳо механизмҳои ташҳиси сохтори код, гурӯҳбандии автоматии хатоҳои ва ташаккули тавсияҳои мутобиқшаванда дар сатҳи маҳдуд татбиқ мегарданд.

Аз ин рӯ, зарурати таҳияи муҳити интеллектуалии омӯзишӣ ба миён меояд, ки дар он таҳлили сохтори код, таснифоти хатоҳои ва механизми тавсияҳои инфиродӣ дар доираи як модели ягона муттаҳид карда шаванд. Модели пешниҳодшуда маҳз барои ҳалли ҳамин масъала равона гардидааст.

Платформаи пешниҳодшаванда ҳамчун системаи мураккаби омӯзишии интеллектуалӣ баррасӣ мегардад, ки дар он раванди таълим дар шакли даврҳои пайдарпай ташкил мешавад ва ҳар давр бо санҷиш, ташҳис, ислоҳ ва арзёбии такрорӣ анҷом меёбад. Ҳангоми пайдо шудани хатои синтаксисӣ платформа онро муайян ва ба донишҷӯ намоён месозад, пас донишҷӯ ислоҳ анҷом медиҳад ва санҷиш такроран иҷро мегардад. Ин раванд то ба даст омадани дурустии пурраи код идома меёбад ва ҳамчун механизми омӯзишии итеративӣ амал мекунад, ки дар он ислоҳи пайдарпай ба устувор шудани малакаҳо мусоидат менамояд. Аз нуқтаи назари назарияи системаҳо чунин

платформа ҳамчун низоми динамикӣ амсиласозӣ мешавад, ки ҳолати он бо маҷмуи параметрҳо тавсиф меёбад, мисли сатҳи хатоӣҳо, дараҷаи мутобиқати сохтор ба меъёрҳои қабулшуда ва нишондиҳандаҳои пешрафти донишҷӯ. Тағйирёбии ин параметрҳо дар ҳар давр имконият медиҳад, ки идоракунии омӯзиш дар асоси маълумоти воқеӣ анҷом дода шавад ва таъсири ҳар як тавсия ба натиҷаи ниҳой баҳогуздорӣ гардад.

Маводҳо ва усулҳои тадқиқот (*Materials and methods*)

Мақсади тадқиқот таҳия ва асосноккунии амсилаи математикӣ ва алгоритмии таснифоти хатоӣҳо мебошад, ки имкони таҳлили ҷузъӣ ва сохтории коди барномаро таъмин намуда, хатоӣҳоро гурӯҳбандӣ мекунад ва идоракунии раванди омӯзишро ба таври мутобиқшаванда ва инфиродӣ мувофиқ ба ниёзҳои донишҷӯён танзим менамояд. Объекти асосии амсиласозӣ коди барномавии донишҷӯ ба ҳисоб рафта, он ҳамчун маҷмуи унсурҳои синтаксисӣ ва мантиқӣ ифода мешавад:

$$C = \{t_1, t_2, \dots, t_n\} \quad (1)$$

Дар ин ҷо ҳар унсури t_i аз нуқтаи назари формалӣ ҳамчун ҷузъи атомии забони барномасозӣ (токен, оператор ё блоки сохторӣ) баррасӣ мешавад. Функсияи таснифотии $T: C \rightarrow E$ шартҳои зерини математикиро таъмин мекунад: (а) пурра будан — ҳар фрагменти коди дорои хатогӣ ҳатман ба яке аз синфҳои мутобиқат мекунад; (б) ягонагӣ — дар ҳар марҳилаи таҳлил, ба ҳар фрагмент танҳо як навъи хатоии бартаридор тибқи меъёри эҳтимолияти максималии $P(ej|ti)$ интисоб мегардад.

Дар он ҳар як унсури t_i метавонад хусусияти синтаксисӣ ё мантиқӣ дошта бошад. Маҳз ба чунин намоиш таъя намуда, таҳлили сохторӣ ва алгоритмӣ анҷом дода мешавад, ки барои ошкор кардани хатоӣҳо ва пешниҳоди тавсияҳои методӣ истифода мегардад. Ин тарзи ифода имкон медиҳад код ҳамчун сохтори дискретӣ баррасӣ шавад ва замина барои татбиқи усулҳои таҳлили сохторӣ ва алгоритмӣ фароҳам ояд. Марҳилаи аввал санҷиши ибтидоии код мебошад, ки тавассути функсияи бинарӣ иҷро мегардад ва ҳолати система муайян карда мешавад, яъне дуруст ё нодуруст будани код арзёбӣ мешавад. Агар дар ин сатҳ мушкilot ошкор гардад, система ба марҳилаи таҳлили амиқ мегузарад. Дар марҳилаи дуюм хатоӣҳо ҳамчун маҷмуи объектҳои таҳлилии муаррифӣ шуда, модели зерин қабул мегардад:

$$T: C \rightarrow E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\} \quad (2)$$

ки дар он E маҷмуи хатоӣҳои ошкоршуда ва T алгоритми тасниф мебошад. Дар ҳамин марҳила таснифоти хатоӣҳо оғоз мешавад. Барои асоснок намудани дурустии модели пешниҳодшуда як қатор хосиятҳои математикӣ муайян карда шуданд, ки кори устувор ва мутобиқати функсияи таснифотиро таъмин менамоянд.

Аввалан, модели пешниҳодшуда хосияти пуррагӣ доро мебошад. Ин маънои онро дорад, ки барои ҳар як унсури таҳлилшавандаи коди барномавӣ ҳадди ақал як синфи хатогӣ муайян карда мешавад:

$$\forall ti \in C, \exists ej \in E: T(ti) = ej \quad (3)$$

Дар натиҷа ягон фрагменти код берун аз раванди таҳлил намеронад ва тамоми фазои додаҳои воридшаванда фаро гирифта мешавад.

Дуюм, модели пешниҳодшуда хосияти ягонагии таснифот таъмин менамояд:

$$\forall ti \in C, \exists! ej \in E: T(ti) = ej \quad (4)$$

Ин муносибат нишон медиҳад, ки дар ҳар марҳилаи таҳлил ба ҳар як унсури код танҳо як синфи бартаридоштаи хатогӣ мувофиқ карда мешавад. Бо ин роҳ эҳтимоли ба вуҷуд омадани таснифоти зиддиятнок бартараф мегардад.

Сеюм, механизми қабули қарор дар асоси принципи эҳтимолияти максималӣ амал мекунад. Агар барои як унсури код якчанд аломати хатогӣ мушоҳида гардад, система синфери интихоб менамояд, ки эҳтимолияти шартии он аз ҳама баланд мебошад:

$$e = \operatorname{argmax} P(ej|ti) \quad (5)$$

Дар натиҷа таснифот хусусияти мутобиқ ва устувор касб мекунад.

Чорум, функсияи тавсиявии $R(ei, H_j) \rightarrow Ak$ ҳамчун оператори гузариш аз ҳолати хатоии ҷорӣ ба маҷмуи амалҳои ислоҳкунанда баррасӣ мешавад. Аз нуқтаи назари назарияи системаҳо чунин гузариш ҳамчун раванди идорашавандаи бозгаштдор амал намуда, дар ҳар итератсия ҳолати система ба ҳолати мақсаднок наздик мешавад.

Аз ин рӯ, модели пешниҳодшуда на танҳо сохтори концептуалӣ, балки асосноккунии формалии математикӣ низ дошта, барои татбиқ дар муҳити интеллектуалии омӯзиши барномасозӣ мутобиқ мебошад.

Аз нуқтаи назари алгоритмӣ равиши пешниҳодшуда ба гурӯҳи алгоритмҳои таснифоти якҷоявӣ дохил шуда, қоидаҳои тасниф бо таҳлили сохтории код дар як раванд муттаҳид карда

мешаванд. Бартариҳои асосии равиш дар он аст, ки навъи хато ба таърифи баъзе қоидаҳои ҷудогона муайян намешавад. Қарор дар асоси маҷмуи нишонаҳо ва хусусиятҳои коди таҳлилшаванда қабул мегардад. Натиҷаи таснифот ба маҷмуи синфҳои хатогӣ нисбат дода мешавад:

$$T(e_j) \in \{S, L, R, P\} \quad (6)$$

ки дар он S хатоҳои синтаксисӣ, L хатоҳои мантиқӣ, R хатоҳои сохторӣ ва P хатоҳои семантикӣ ё параметрӣ мебошад. Дар доираи ин амсила, қоидаҳои муайянсозии навъи хато ба таври расмӣ муайян карда мешаванд, аммо механизми омӯзиш ва ислоҳ бо назардошти сатҳ ва ниёзҳои донишҷӯ хусусияти мутобиқшаванда касб мекунад.

Дар доираи таҳқиқоти мазкур барои таҳлили автоматии хатоҳо чор синфи асосӣ истифода гардидаанд: хатоҳои синтаксисӣ, мантиқӣ, сохторӣ ва иҷроӣ. Ин гурӯҳҳо қисми зиёди хатоҳои маъмулро, ки дар раванди омӯзиши ибтидоии барномасозӣ ба назар мерасанд, фаро мегиранд.

Бо вучуди ин, таҳлили таҳқиқотҳои муосири соҳаи муҳандисии нармафзор нишон медиҳад, ки таснифоти хатоҳои метавонад васеътар бошад. Аз ҷумла, хатоҳои семантикӣ, хатоҳои амниятӣ ва хатоҳои тарҳрезии нармафзор низ аҳамияти муҳим доранд.

Хатоҳои семантикӣ дар ҳолатҳои ба вучуд меоянд, ки барнома аз нуқтаи назари синтаксис дуруст буда, вале натиҷаи ҳосилшуда ба талаботи масъала мувофиқат намекунад. Хатоҳои амниятӣ ба коркарди нодурусти додаҳо, осебпазирии барнома ва истифодаи конструкцияҳои хатарнок вобаста мебошанд. Хатоҳои тарҳрезӣ бо сохтори номуносиби барнома, такроршавии код ва вайроншавии принципҳои муҳандисии нармафзор алоқаманданд.

Дар марҳилаи кунунии таҳқиқот гурӯҳҳои мазкур ба модели амалӣ ворид карда нашудаанд, зеро ҳадафи асосии таҷриба таҳлили хатоҳои мебошад, ки бештар дар сатҳи ибтидоии омӯзиши барномасозӣ мушоҳида мешаванд. Бо вучуди ин, сохтори модели пешниҳодшуда имконият медиҳад, ки дар марҳилаҳои минбаъдаи рушд синфҳои иловагӣ хатоҳо низ ба система ҳамгиро карда шаванд. Аз ин рӯ, маҳдудияти мазкур хусусияти техникӣ дошта, ба сохтори назариявии модели пешниҳодшуда таъсири манфӣ намерасонад.

Таснифоти пешниҳодшуда барои марҳилаи аввали татбиқи платформаи пешбинӣ шудааст. Дар амсилаи такмилёфтаи ояндаи система ин таснифот бо се синфи иловагӣ васеъ карда мешавад: хатоҳои семантикии амиқ (Sem) — номувофиқатии мантикии байни мақсади алгоритм ва натиҷаи воқеи он; хатоҳои амниятӣ (Sec) — масалан садамаи буфер ё коди осебпазир; хатоҳои тарҳрезии барномавӣ (Des) — вайрон кардани принципҳои модулии SOLID ё дучандшавии беасоси код. Маҷмуи умумии синфҳо: $E = \{S, L, R, P, Sem, Sec, Des\}$.

Пас аз анҷоми таснифот марҳилаи навбатӣ оғоз меёбад, ки дар он алгоритми ташаккулдиҳии тавсияҳои омӯзишӣ фаъл мегардад. Ин алгоритм ба синфи алгоритмҳои қароргирии мутобиқшаванда дохил шуда, қори он аз навъи хатоҳои муайяншуда ва маълумоти ҷамъшуда оид ба траекторияи омӯзишӣ донишҷӯ вобаста мебошад. Траекторияи омӯзиш таърихи иҷро, такроршавии хатоҳо ва динамикаи пешрафтро дар бар мегирад. Бо дарназардошти синфҳои асосии хатоҳои баррасишуда, марҳилаи навбатии модел ташаккули механизми тавсияҳои мутобиқшаванда мебошад. Функсияи тавсияҳо ба шакли зерин ифода мешавад:

$$R(e_i, H_j) \rightarrow A_k \quad (7)$$

ки дар он e_i хатоҳои муайяншуда, H_j таърихи омӯзишӣ донишҷӯ ва A_k тавсия ё амали тавсиявӣ барои ислоҳи хато мебошад. Функсияи $R(e_i, H_j) \rightarrow A_k$ дорои хусусияти марковии шартӣ мебошад: тавсияи A_k танҳо ба ҳолати ҷорӣ e_i ва таърихи маҳдуди H_j вобаста аст, на ба тамоми таърихи пешинаи омӯзиш — ин имкони ҳисоббарории самаранокро дар вақти воқеӣ таъмин мекунад. Дар натиҷа, такмили код ҳамчун раванди давравӣ ва мутобиқшаванда амалӣ шуда, дар ҳар даври такрорӣ бо дарназардошти натиҷаҳои пешина сатҳи дониш ва маҳорати донишҷӯ беҳтар мегардад ва ҳамзамон сифати коди барномавӣ ба таври пайваستا боло меравад:

$$C^{(t+1)} = C^{(t)} + \Delta C^{(t)} \quad (8)$$

дар ин ҷо $\Delta C(t)$ тағйироте мебошад, ки барои ислоҳи хатоҳо ба код ворид карда мешавад, ва раванд то расидан ба ҳолати устувор идома меёбад.

Аз нуқтаи назарияи системаҳои динамикӣ раванди пешниҳодшуда ҳамчун пайдарпайии ҳолатҳои система баррасӣ мешавад. Агар шумораи хатоҳо дар ҳар итератсия кам гардад ва сифати коди барномавӣ афзоиш ёбад, он гоҳ система ба ҳолати устувор наздик мешавад. Дар чунин шароит

қимати функсияи баҳодихӣ тадричан беҳтар гардида, иҷрои пайдарпайи тавсияҳои пешниҳодшуда боиси кам шудани шумораи хатоҳо ва баланд гардидани сифати коди барномавӣ мегардад. Ин хусусият дурустии истифодаи модели пешниҳодшударо дар муҳити интерактиви омӯзиш асоснок менамояд.

Таҳлили таҷрибаи амалии мавҷуда нишон медиҳад, ки қисми зиёди платформаҳои омӯзиши барномасозӣ ба санҷиши сатҳии код маҳдуд мешаванд, яъне онҳо асосан натиҷаи иҷрои барномаро месанҷанд. Дар чунин муҳитҳо хатоӣ бештар ҳамчун нишонаи нокомӣ қабул мешавад ва камтар ҳамчун манбаи омӯзиш ва рушд истифода мегардад. Аз ин рӯ, донишҷӯ аксаран на иллати пайдоиши хатоиро пурра дарк мекунад ва на механизми дурусти ислоҳи онро ба таври низомнок аз худ менамояд. Маҳз ҳамин ҳолат зарурати таҳияи платформаҳоро тақвият медиҳад, ки дар онҳо хатоӣ ҳамчун унсурӣ марказӣ ва идоракунондаи раванди таълим баррасӣ гардад [5].

Дар чараёни тадқиқот як қатор алгоритмҳои гуногуни таснифотӣ татбиқ гардиданд, ки хусусиятҳо ва параметрҳои умумии онҳо дар ҷадвали 2 ҷамъбаст шудаанд.

Ҷадвали 2 – Тасниф ва хусусиятҳои алгоритмҳои истифодашуда
Table 2 – Classification and characteristics of the algorithms used

Намуди хато	Нишонаҳои намунавӣ	Алгоритми тасниф	Манбаи қоида ё тақмил
Синтаксисӣ	иштибоҳ дар рамзгузорӣ, қавсҳо, операторҳо	Random Forest	қоидаҳои синтаксиси забон
Мантиқӣ	шартҳои нодуруст, даври беохир, тартиби хатоӣ амалҳо	Decision Tree	қоидаҳои алгоритмӣ ва намунаҳои хатоӣ маъмул
Сохторӣ	калон шудани функсияҳо, мураккабии зиёди код, такроршавӣ	SVM	меъёрҳои сохторӣ ва нишондиҳандаҳои мураккабӣ
Параметрӣ ва самаранокӣ	вақти зиёд, истеъмоли зиёди хотира, маҳдудиятҳои иҷро	K-NN	меъёрҳои иҷро ва профили иҷрош

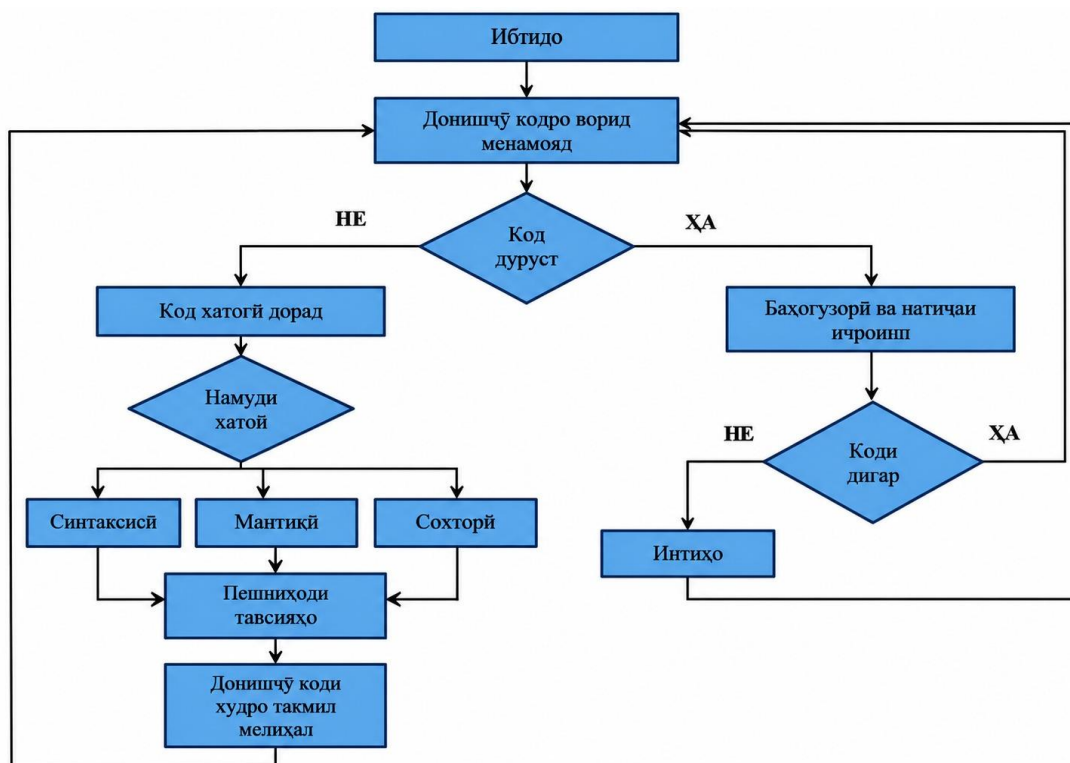
Барои таъмини фаъолияти самараноки алгоритмҳои таснифотӣ дар доираи таҳқиқот маҷмуи додаҳои омӯзишӣ ташақкул дода шуд, ки аз 1200 фрагменти коди барномавии донишҷӯён иборат мебошад. Маълумоти ибтидоӣ аз корҳои лабораторӣ, супоришҳои инфиродӣ ва лоиҳаҳои таълимии донишҷӯён иxtисосҳои технологияҳои иттилоотӣ ҷамъоварӣ гардида, баъдан аз ҷониби мутахассисони соҳаи барномасозӣ тамғагузорӣ карда шуданд. Барои таъмини мувозинати синфҳо маҷмуи додаҳо ба чор гурӯҳи асосии хатоҳо ҷудо карда шуд: синтаксисӣ, мантиқӣ, сохторӣ ва параметрӣ, ки барои ҳар гурӯҳ тақрибан 300 намуна истифода гардид.

Дар марҳилаи ташаққули фазои хусусиятҳо маҷмуи нишондиҳандаҳои сохторӣ ва функционалии код интихоб карда шуданд. Ба ин гурӯҳ шумораи операторҳо, қавсҳо ва аломатҳои ҷудокунонда, амиқии дарахти синтаксисӣ (AST), шумораи конструкцияҳои шартӣ ва такрорӣ, нишондиҳандаҳои мураккабии сохторӣ, вақти иҷрои барнома ва ҳаҷми хотираи истифодашуда дохил гардиданд. Ин хусусиятҳо ҳамчун вектори параметрҳои воридотӣ барои алгоритмҳои омӯзиши машинӣ истифода шуданд.

Омӯзиши моделҳо тибқи усули назоратшаванда амалӣ гардид. Барои ин маҷмуи додаҳо бо таносуби 80% барои омӯзиш ва 20% барои санҷиш ҷудо карда шуда, бо мақсади баланд бардоштани эътимоднокии натиҷаҳо усули панҷкаратаи cross-validation истифода шуд. Дар чараёни омӯзиш Random Forest барои таснифи хатоҳои синтаксисӣ, Decision Tree барои муайян намудани хатоҳои мантиқӣ, SVM барои таҳлили сохтории код ва K-NN барои баҳогузории нишондиҳандаҳои самаранокии иҷрош татбиқ гардиданд.

Натиҷаҳои озмоиш нишон доданд, ки алгоритмҳои интихобшуда барои таҳлис ва гурӯҳбандии хатоҳои самаранок мебошанд. Дақиқии миёнаи таснифот барои Random Forest ба 92,4%, барои SVM ба 90,7%, барои Decision Tree ба 88,1% ва барои K-NN ба 86,9% баробар гардид. Натиҷаҳои мазкур асоснокии интихоби алгоритмҳои пешниҳодшударо тасдиқ намуда, мувофиқати онҳоро барои истифода дар платформаи интеллектуалии омӯзиши барномасозӣ нишон медиҳанд.

Маълумоти қадвали 2 нишон медиҳад, ки равиши пешниҳодшаванда имкон медиҳад хатоҳои дар самтҳои синтаксисӣ, мантиқӣ, сохторӣ ва параметрӣ ё самаранокӣ муайян ва таҳлил карда шаванд. Раванди мазкур то расидан ба ҳолати устувор идома меёбад, яъне то таъмин гардидани дурустии пурраи код. Дар асоси амсилаи пешниҳодшуда, пайдарпайии иҷрои алгоритм дар шакли блок-схема нишон дода мешавад.



Расми 1 – Блок-схемаи раванди таҳлил ва таснифоти хатоҳои
Figure 1 – Flowchart of the error analysis and classification process

Барои татбиқи амалии модели пешниҳодшуда меъморӣ бисёрқабатаи платформа таҳия гардид. Меъморӣ мазкур аз се сатҳи асосӣ иборат мебошад: сатҳи муаррифии маълумот, сатҳи мантиқӣ татбиқотӣ ва сатҳи нигоҳдории додаҳо.

Сатҳи муаррифии маълумот ҳамкориҳои мустақими донишҷӯро бо система таъмин менамояд. Дар ин сатҳ муҳаррири интерактивии код, воситаҳои воридкунии супоришҳо ва интерфейси намоиши тавсияҳо ҷойгир карда шудаанд.

Сатҳи мантиқӣ татбиқотӣ қисми асосии интеллектуалии система мебошад. Дар ин сатҳ модули таҳлили синтаксисӣ, таснифоти хатоҳои, муҳаррики тавсияҳо ва модули идоракунии профили донишҷӯ фаъолият менамоянд. Маҳз дар ҳамин қисм алгоритмҳои Random Forest, Decision Tree, SVM ва K-NN барои коркарди маълумот ва қабули қарор истифода мешаванд.

Сатҳи нигоҳдории додаҳо вазифаи нигоҳдорӣ ва идоракунии маълумотро иҷро менамояд. Дар базаи додаҳо маълумот дар бораи донишҷӯён, таърихи омӯзиш, натиҷаҳои санҷиш, хатоҳои ошкоршуда ва тавсияҳои пешниҳодшуда сабт мегарданд.

Блок-схема мантиқӣ кори платформи санҷиши автоматикии кодро дар шакли равиши давравӣ инъикос мекунад ва ду шохҳои асосиро дар бар мегирад, шохҳои ташхис ва ислоҳи хатоҳои ва шохҳои баҳогузори пас аз дуруст иҷро шудани код. Дар марҳилаи аввал ҳолати «код дуруст» санҷида мешавад. Агар код дуруст бошад, натиҷаи иҷроиш баҳогузори мегардад ва вобаста ба идома ё интиҳоби кори нав раванд ё такрор мешавад ё анҷом меёбад. Агар код нодуруст бошад, система ба марҳилаи ташхис мегузарад, навъи хатогӣ муайян карда мешавад ва хатоҳои ба гурӯҳҳои синтаксисӣ, мантиқӣ ва сохторӣ ҷудо мешаванд. Баъдан тавсияҳои мувофиқ ташақкул ёфта, донишҷӯ коди худро

такмил медиҳад ва санҷиш такроран иҷро мегардад. Ин тартиб принципи омӯзиши итеративиро таъмин намуда, такмилро то расидан ба ҳолати дурустии пурраи код идома медиҳад [6].

Прототипи платформа дар асоси меъморӣ сетабақаи клиент–сервер–базаи додаҳо тарҳрезӣ шудааст. Қисми frontend бо HTML5/JavaScript татбиқ гардида, муҳаррири интерактивии коди манбаъ ва намоиши блок-схемаи натиҷаро таъмин мекунад. Қисми backend бо забони Python ва чорчӯбаи Flask сохта шуда, аз чор модули асосӣ иборат аст: (1) модули таҳлили лексикӣ-синтаксисӣ — бар асоси китобхонаи AST барои сохтани дарахти AST; (2) модули таснифоти хатоҳо — бар асоси алгоритмҳои Random Forest/Decision Tree/SVM/K-NN; (3) модули тавлиди тавсияҳо — тибқи функсияи $R(e_i, H_j) \rightarrow A_k$; (4) модули профили донишҷӯ — барои нигоҳдории таърихи H_j . Алоқаи байни модулҳо тариқи REST API амалӣ мегардад. Базаи додаҳо дар PostgreSQL татбиқ шудааст, ки профили донишҷӯён, таърихи иҷрои код ва натиҷаи таҳлилро дар ҷадвалҳои алоҳида нигоҳ медорад.

Натиҷаҳо (Results)

Натиҷаҳои таҳлили назариявӣ нишон медиҳанд, ки амсилаи пешниҳодшуда барои баланд бардоштани омӯзиши барномасозӣ ба сатҳи сифатан нав заминаи устувор фароҳам меорад. Платформаи пешниҳодшаванда имконият медиҳад на танҳо мавҷудияти хатоиро муайян намояд, балки омилҳои пайдоиш, навь ва дараҷаи таъсири онро ба сохтори умумии барнома дар шакли таҳлилий арзёбӣ кунад [7]. Самаранокӣ омӯзиш тавассути нишондиҳандаи интегралӣ баҳогузорӣ мешавад, ки коҳиши шумораи хатоҳоро дар ҷараёни итератсияҳои пайдарпай инъикос менамояд:

$$N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (1 - \frac{|E_i|}{|C_i|}) \quad (9)$$

ки дар он n шумораи итератсияҳо, E_i маҷмуи хатоҳои ошкоршуда дар итератсияи i ва C_i маҷмуи унсурҳои коди таҳлилшаванда дар ҳамаи итератсия мебошад. Қимати $|E_i|$ шумораи хатоҳо, ва $|C_i|$ ҳаҷми унсурҳои коди барнома, масалан шумораи токенҳо, операторҳо ё ғиреҳои дарахти синтаксисиро ифода мекунад, вобаста ба усули интиҳобшудаи намоиши код. Дар шароити таҷрибавӣ қимати N барои ҳар донишҷӯ ё ғурӯҳи донишҷӯён дар давоми иҷрои пайдарпай ҳисоб карда шуда, афзоиши он ҳамчун нишонаи беҳтар шудани сифати код ва самаранокӣ равиши мутобиқшаванда маънидод мегардад [8].

Нишондиҳандаи N дар шакли пешниҳодшуда танҳо нисбати шумораи хатоҳоро ба ҳаҷми умумии код инъикос мекунад ва барои муқоисаи объективӣ донишҷӯёни бо сатҳи гуногуни тайёрӣ ё масъалаҳои дорои дараҷаи мухталифи мураккабӣ кофӣ нест. Барои бартараф кардани ин маҳдудият, тавсия дода мешавад, ки нишондиҳандаи мазкур бо коэффисиенти вазнии мураккабии масъала D (бар асоси метрикаи сиклматикии Маккейб) ва сатҳи ибтидоии донишҷӯ θ_0 муттаҳид карда шавад:

$$N = \sum_{i=1}^n \left\{ \left(1 - \frac{|E_i|}{|C_i|} \right) \cdot \frac{|D_k|}{|\theta_0|} \right\} \quad (10)$$

Барои бартараф намудани маҳдудиятҳои нишондиҳандаи анъанавӣ баҳодиҳӣ ба формулаи пешниҳодшуда ду параметри иловагӣ дохил карда шуданд: коэффисиенти мураккабии масъала D ва нишондиҳандаи сатҳи ибтидоии омодагии донишҷӯ θ_0 .

Параметри D дараҷаи мураккабии масъалаи барномавиро инъикос намуда, дар асоси хусусиятҳои сохтори алгоритм муайян карда мешавад. Ҳангоми ҳисобкунии он шумораи операторҳои шартӣ, конструкцияҳои такрорӣ, амиқии шоҳабандӣ ва ҳаҷми умумии алгоритм ба назар гирифта мешаванд. Қимати D бо зиёд гардидани мураккабии масъала афзоиш меёбад.

Нишондиҳандаи θ_0 бошад сатҳи ибтидоии дониш ва малақаҳои донишҷӯро пеш аз оғози омӯзиш тавсиф менамояд. Барои муайян намудани ин параметр натиҷаҳои санҷиши ибтидоӣ, сатҳи иҷрои супоришҳои пешакӣ ва дараҷаи азхудкунии мафҳумҳои асосии барномасозӣ истифода шуданд.

Ворид намудани параметрҳои мазкур имконият медиҳад, ки баҳодиҳии самаранокӣ омӯзиш на танҳо аз рӯи шумораи хатоҳо, балки бо дарназардошти душвории масъала ва сатҳи омодагии донишҷӯ анҷом дода шавад.

Нисбат ба модели ибтидоӣ нишондиҳандаи пешниҳодшуда хусусияти мутобиқшаванда дорад. Агар ду донишҷӯ шумораи яхелаи хатоҳо дошта бошанд, вале масъалаҳои сатҳи гуногуни мураккабиро иҷро намоянд, қимати нишондиҳанда барои онҳо фарқ хоҳад кард. Ҳамин тавр, модели нав на танҳо натиҷаи ниҳой, балки шароити ба даст овардани онро низ ба ҳисоб мегирад. Ин хусусият эътимоднокӣ ва адолатнокии механизми баҳодиҳиро зиёд менамояд.

Ин тавсеа имкон медиҳад, ки баҳодиҳии самаранокӣ омӯзиш аз таъсири мустақими сатҳи душвории супориш мустақил гардад.

Барои санҷиши амалии модели пешниҳодшуда, озмоиши таҷрибавӣ бо иштироки 42 нафар донишҷӯи курси якуми ихтисоси «Технологияҳои иттилоотӣ» гузаронида шуд. Донишҷӯён дар давоми 6 ҳафта дар ҷорҷӯбаи курси «Асосҳои барномасозӣ ба забони Python» бо прототипи платформа кор карданд. Шумораи миёнаи хатоҳо аз 14,3 (ҳафтаи якум) то 5,7 (ҳафтаи шашум) коҳиш ёфт, ки ба афзоиши N аз 0,42 то 0,81 баробар шуд. Дар гурӯҳи назоратӣ ($n=20$, бе тавсияҳои инфиродӣ) N танҳо то 0,58 расид. Тафовути байни гурӯҳҳо тибқи озмоиши t -Student бо $p<0,05$ муайян шуд.

Дар ҷараёни таҷриба ҳамаи натиҷаҳо дар базаи додаҳои платформа нигоҳ дошта шуда, баъдан бо истифода аз усулҳои омории таҳлил коркард гардиданд. Барои муқоисаи гурӯҳҳои таҷрибавӣ ва назоратӣ озмоиши t -Student истифода шуд, ки имконият медиҳад аҳамиятнокии омории фарқиятҳои мушоҳидашаванда муайян карда шавад.

Ҷадвали 3 – Натиҷаҳои озмоиши таҷрибавии платформа
Table 3 – Results of the Experimental Testing of the Platform

Нишондиҳанда	Ҳафтаи 1	Ҳафтаи 6
Шумораи миёнаи хатоҳо	14,3	5,7
Вақти миёнаи ислоҳи хато (дақ.)	23,4	11,2
Ҷои супоришҳои муваффақ	51 %	88 %
Нишондиҳандаи N	0,42	0,81

Натиҷаҳои муқоисавии гурӯҳҳои таҷрибавӣ ва назоратӣ нишон доданд, ки фарқияти бадастомада хусусияти тасодуфӣ надорад. Қимати $p<0,05$ тасдиқ менамояд, ки беҳбудии нишондиҳандаҳои омӯзишӣ бо истифодаи модели пешниҳодшуда алоқаманд буда, аз нуқтаи назари омории аҳамиятнок мебошад. Ин натиҷаҳо қобилияти амалии татбиқи платформа ва самаранокӣ механизми таҳлил, таснифот ва тавсияҳои мутобиқшавандаро тасдиқ мекунанд.

Маълумоти ҷадвали 3 нишон медиҳад, ки истифодаи механизми таҳлил ва тавсияҳои мутобиқшаванда боиси коҳиши назарраси шумораи хатоҳо ва баланд гардидани сифати иҷрои супоришҳо шудааст. Дар давоми озмоиш шумораи миёнаи хатоҳо зиёда аз 60% коҳиш ёфта, нишондиҳандаи интегралӣ N қариб ду маротиба афзоиш ёфт. Ҳамзамон вақти миёнаи ислоҳи хатоҳо кам гардид, сатҳи иҷрои муваффақонаи супоришҳо ба таври назаррас баланд шуд.

Амсилаи пешниҳодшуда бо як қатор хусусиятҳои фарқкунанда тавсиф меёбад, ки онро аз равишҳои анъанавӣ ҷудо месозанд. Аввал, платформа ҳамчун муҳити омӯзиши мутобиқшаванда баррасӣ мегардад, ки ба таҳлили сохтори код таъҷиб мекунанд ва ба арзёбии натиҷаи иҷроӣ маҳдуд наменоманд. Он сабабҳои пайдоиши хатоҳоро ошкор намуда, мантиқи бартарафсозии онҳоро шарҳ медиҳад. Дуюм, амсилаи математикӣ ва алгоритмҳои татбиқшуда имкон медиҳанд, ки омӯзиш дар шакли давраӣ бо механизми бозгашт таъмин гардад. Дар чунин равиш ҳар қадами таҷрибаи код дар сатҳи ҳисоббарорӣ расмӣ мегардад, натиҷаҳои санҷиш ба шакли параметрҳои амсила таҷлил меёбанд ва барои коркарди минбаъдаи алгоритм истифода мешаванд. Ин хусусият ба низом қобилияти идоракунии мутобиқшаванда медиҳад, ки барои фанҳои техникӣ, махсусан дар омӯзиши барномасозӣ, аҳамияти амалӣ дорад. Сеюм, алгоритми калидии платформа ҳамчун алгоритми яқинӣ таснифотӣ ва давраӣ бо механизми бозгашт шарҳ дода мешавад. Принсипи кори он ба ҳамгироии қоидаҳои муайянкунандаи навъи хато, амсилаи қабули қарор ва таҳлили сохтори код асос меёбад. Бартариҳои ин равиш дар он аст, ки қарор бо таъҷиб ба як нишонаи ҷудогона қабул намешавад. Баръакс, маҷмуи аломатҳо ва параметрҳо ба таври ҳамзамон ба ҳисоб гирифта мешаванд, аз ҷумла хусусиятҳои хатогӣ, маълумоти таърихи омӯзишӣ донишҷӯ ва тавсияҳои тавлидшуда. Бо ин роҳ алгоритм метавонад ҳам дар ҳолатҳои маҷмӯӣ ва ҳам дар ҳолатҳои мураккаб бо устуворӣ ва дақиқии баланд фаъолият намояд. Ҳамзамон табиати мутобиқшавандаи алгоритм таъмин мегардад, яъне вобаста ба навъи хатоҳо ва хусусиятҳои сохтори код сатҳи таҳлил ва роҳҳои ислоҳ тағйир меёбанд. Ин ҷузъ имконият медиҳад, ки траекторияи омӯзиш барои ҳар донишҷӯ мувофиқ ба сатҳи омодагӣ ва эҳтиёҷоти ӯ танзим шавад. Бо таъҷиб ба механизми давраӣ, платформа метавонад на танҳо хатоҳоро ошкор ва тасниф намояд, балки барои ҳар даври иҷроӣ маҷмуи нави тавсияҳои

ислохро ташакул диҳад. Дар натиҷа сифати коди барномавӣ пайваста баланд шуда, шумораи хатоҳои коҳиш меёбад. Формулаҳои математикӣ ва амсилаҳои пешниҳодшуда ин равандро расмӣ мегардонанд ва шароит фароҳам меоранд, ки самаранокии омӯзиш бо нишондиҳандаҳои ҳисоббарорӣ арзёбӣ шавад [9].

Муҳокима (Discussion)

Аҳаммияти илмӣ тадқиқот дар он зоҳир мешавад, ки барои омӯзиши барномасозӣ низоми интеллектуалӣ пешниҳод мегардад, ки дар он мутобиқшавӣ, таҳлили сохтори код ва механизми тавсиягарӣ дар як ҷаҳорҷӯбаи ягона муттаҳид мешаванд. Ин ҳамгирӣ омӯзишро аз сатҳи танҳо санҷиши натиҷаи иҷроӣ берун мебарорад ва ба он хусусияти таҳлилӣ ва амалӣ медиҳад. Донишҷӯ имконият пайдо мекунад хатоҳои худро на танҳо ислоҳ кунад, балки сабабҳои онҳоро дарк намояд ва малакаи сохтани коди дуруст ва асоснокро тадриҷан ташакул диҳад. Навовариҳои илмӣ инчунин дар пайвастагии амсилаи математикӣ, алгоритмҳои яққоявӣ, функсияҳои расмӣ ва тасвири раванд дар шакли блок-схема ифода меёбад.

Фарқи бунёдии равиши пешниҳодшуда аз платформаҳои мавҷуда (Codeforces, LeetCode, HackerRank, Codecademy) дар се ҷиҳати мушаххас зоҳир мегардад, ки дар Ҷадвали 1 ба таври миқдорӣ нишон дода шудаанд: якум, ҳамгирӣ чор алгоритми гуногуни таснифотӣ дар як механизми давравӣ (на алгоритми ягона), ки имкони таҳлили дифференсиалии навъҳои мухталифи хатоиро медиҳад; дуюм, функсияи тавсиявии шартӣ марковӣ $R(e_i, H_j) \rightarrow A_k$, ки тавсияро ба таърихи инфиродии донишҷӯ алоқаманд мекунад, на ба қоидаи статикӣ ягона; сеюм, тасдиқи таҷрибавӣ ин равиш бо озмоиши 42 нафар донишҷӯ, ки афзоиши N аз 0,42 то 0,81-ро собит кард. Маҳз ин се ҷузъ яққоя дар платформаҳои таҳлилшуда мушоҳида намешаванд.

Ин маҷмӯъ раванди омӯзишро ҳамчун низоми дорой ҳолат ва параметрҳои тағйирёбанда моделсозӣ намуда, барои таҳлили рафтор ва динамикаи омӯзиши донишҷӯ асоси методӣ фароҳам меорад. Бартариҳои калидии платформа дар ҳамгирӣ муназзами амсила, алгоритми тасниф ва омӯзиши мутобиқшаванда ифода меёбад. Баръакси равишҳои анъанавӣ, ки натиҷаро бештар ҳамчун ҳолати нисбатан статикӣ арзёбӣ мекунанд, дар ин ҷо омӯзиш ҳамчун низоми динамикӣ баррасӣ мегардад ва тавассути механизми бозгашт қарорҳо ба иттилооти воқеии раванди иҷро таъям мекунанд. Ин хусусият бо тамоюлҳои муосири таҳияи муҳитҳои омӯзишии интеллектуалӣ ҳамоҳанг буда, барои таҳқиқоти минбаъда дар самти омӯзиши мутобиқшаванда ва истифодаи зеҳни сунъӣ имкониятҳои нав фароҳам меорад.

Натиҷаҳои бадастомада бо тамоюлҳои муосири рушди системаҳои интеллектуалии омӯзишӣ мувофиқат менамоянд. Фарқияти асосӣ дар он мебошад, ки дар доираи таҳқиқоти мазкур ташҳиси сохтори код, таснифоти хатоҳои ва механизми тавсияҳои мутобиқшаванда дар шакли ягона муттаҳид карда шудаанд. Ин хусусият модели пешниҳодшударо аз қисми зиёди қарорҳои мавҷуда фарқ менамояд.

Навгониҳои илмӣ таҳқиқоти мазкур дар нуктаҳои зерин ифода меёбад:

- Амсилаи математикӣ барои ҳамгирӣ таҳлили сохтори коди барномавӣ, таснифоти автоматӣ хатоҳои ва механизми мутобиқшавандаи омӯзиш пешниҳод гардид, ки имкон медиҳад тамоми марҳилаҳои таҳлил дар доираи муҳити ягона амалӣ гарданд.

- Функсияи тавсиявии $R(e_i, H_j) \rightarrow A_k$ таҳия гардид, ки байни навъи хатоии ошкоршуда, таърихи омӯзиши донишҷӯ ва маҷмӯи амалҳои ислоҳкунанда робитаи формалӣ барқарор менамояд.

- Равиши маҷмӯи истифодаи алгоритмҳои Random Forest, Decision Tree, SVM ва K-NN барои ташҳис ва гурӯҳбандии хатоҳои барномавӣ пешниҳод гардид, ки нисбат ба истифодаи як алгоритми алоҳида имконияти баланд бардоштани дақиқии таснифотро фароҳам меорад.

- Нишондиҳандаи тақмилёфтаи баҳодиҳии самаранокии омӯзиш таҳия шуд, ки дар баробари шумораи хатоҳои мураккабии масъала ва сатҳи ибтидоии омодагии донишҷӯро низ ба ҳисоб мегирад.

- Самаранокии модели пешниҳодшуда дар муҳити воқеии таълимӣ бо иштироки 42 нафар донишҷӯ таҷрибавӣ санҷида шуда, аҳамиятнокии омории натиҷаҳои бадастомада тасдиқ гардид.

Хулоса (Conclusion)

Дар мақола амсилаи платформаи интеллектуалии санҷиш ва омӯзиши барномасозӣ пешниҳод ва асоснок карда шуд, ки татбиқи он дар муҳити таълимӣ имконпазир мебошад. Дар доираи амсила пайдарпайии равандҳои омӯзишӣ дар шакли расмӣ муайян гардида, санҷиши ибтидоии код, таҳхис ва таснифи хатоҳо, ташаккули тавсияҳо ва тақмили такрорӣ код ҳамчун марҳилаҳои бо ҳам пайваст ба танзим дароварда шуданд. Равиши пешниҳодшуда ба алгоритмҳои таснифоти хатоҳо ва воситаҳои амсиласозии математикӣ таъя мекунад, ки имкон медиҳад хатоҳо на танҳо ошкор ва ғуруҳбандӣ шаванд, балки сабабҳои эҳтимолии онҳо низ дар сатҳи сохторӣ шарҳ дода шаванд. Алгоритмҳои татбиқшуда хусусияти давравӣ, бозгаштдор ва мутобиқшаванда доранд. Натиҷаҳои озмоиши пилотӣ бо иштироки 42 нафар донишҷӯ нишон дод, ки N аз 0,42 то 0,81 афзоиш ёфт ($p < 0,05$), ки самаранокии амалии платформаро тасдиқ мекунад. Дар маҷмӯъ, татбиқи платформа метавонад самаранокии баҳогузорӣ ва дастгирии омӯзишро зиёд намояд ва барои рушди насли нави муҳитҳои омӯзишии интеллектуалӣ дар фанҳои техникаи заминаи методӣ ва илмӣ фароҳам оварад.

Муқарриз: Шерматов Ш.М. — н.и.ф.-м., дотсенти ДДХ ба номи академик Б. Гафуров.

Адабиёт

1. Боголюбов, А.Н. Основы математического моделирования / А.Н. Боголюбов. – М.: МГУ, 2005. – 220 с.
2. Булавин, Л.А. Компьютерное моделирование физических систем / Л.А. Булавин, Н.В. Выгорницкий, Н.И. Лебовка. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 352 с.
3. Ваганова, О.И. Возможности облачных технологий в электронном обучении / О.И. Ваганова [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 6–2. – С. 183–187.
4. Василишина, Н.В. Применение метода компьютерного моделирования в обучении математике / Н.В. Василишина // Вестник Адыгейского государственного университета. – 2016. – № 2 (178). – С. 62–67.
5. Веретин, Р.С. Анализ эффективности цифровых образовательных платформ с поддержкой искусственного интеллекта / Р.С. Веретин. – М.: МГПУ, 2025. – 98 с.
6. Данилов, О.Е. Учебная компьютерная модель системы связанных осцилляторов / О.Е. Данилов // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2017. – № 4 (118). – С. 116–121.
7. Добрица, В.П. Применение интеллектуальной адаптивной платформы в образовании / В.П. Добрица, Е.И. Горюшкин // Auditorium. Курский государственный университет. – 2019. – № 1 (21). – С. 23–30.
8. Кашина, О.А. Система управления обучением как основа организации электронного обучения в вузе / О.А. Кашина // Образовательные технологии и общество. – 2018. – № 2. – С. 431–438.
9. Клиначев, Н.В. Основы моделирования систем / Н.В. Клиначев. – М.: Академия, 2000. – 321 с.
10. Кочеткова, Т.О. Адаптивная образовательная стратегия обучения математике студентов в электронной среде / Т.О. Кочеткова, О.А. Карнаухова // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В. П. Астафьева. – 2018. – № 2. – С. 50–56.
11. Куликова, Е.А. Подготовка в процессе обучения к будущей профессиональной деятельности в условиях неопределенности / Е.А. Куликова // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 12 (68). – С. 1123–1130.
12. Лебедева, А.А. Прогноз пространственно-временной динамики с применением машинного обучения / А.А. Лебедева, А.А. Гарашенко, Д.Н. Сидоров // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2025. – № 3. – С. 22–37.
13. Медянкина, Е.Л. Модель адаптивного интеллектуального обучения бакалавров технического профиля / Е.Л. Медянкина, Н.Д. Куркурин // Системная инженерия и инфокоммуникации. – 2025. – № 3. – С. 15–26.
14. Пырин, А.В. Выбор алгоритма программированного обучения в рамках проблемы клипового мышления современных школьников / А.В. Пырин // Аллея науки. – 2019. – № 1 (28). – С. 888–891.
15. Рыбцова, Л.Л. Современные образовательные технологии : учебное пособие / под ред. Л. Л. Рыбцовой. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 92 с.
16. Советов, Б.Я. Моделирование систем : учебник для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
17. Татарникова, С.А. Адаптивное обучение как технология персонализированного профессионального обучения / С.А. Татарникова, И.А. Чаунина // Ratio et Natura. – 2022. – № 1 (5). – С. 16.
18. Baxter, I. Clone Detection Using Abstract Syntax Trees / I. Baxter, A. Yahin, L. Moura, M. Sant'Anna, L. Bier // Proceedings of the International Conference on Software Maintenance (ICSM). – Bethesda, MD, USA, 1998. – P. 368–377.
19. Brusilovsky, P. Adaptive educational hypermedia: from generation to generation / P. Brusilovsky // Proceedings of the 4th Hellenic Conference on Information and Communication Technologies in Education. – Athens, Greece, 2004. – P. 19–33.

20. Kabudi, T. AI-enabled adaptive learning systems: A systematic mapping of the literature / T. Kabudi, I. Pappas, D.H. Olsen // *Computers and Education: Artificial Intelligence*. – 2021. – Vol. 2. – Art. 100017.
21. Kytmanov, A.A. Competency-based Learning in Higher Mathematics Education as a Cluster of Efficient Approaches / A.A. Kytmanov, M.V. Noskov, K.V. Safonov, M.V. Savelyeva, V.A. Shershneva // *Bolema: Mathematics Education Bulletin*. – 2016. – Vol. 30, № 56. – P. 1113–1126.
22. Li, F. Progress, challenges and countermeasures of adaptive learning: A systematic review / F. Li, Y. He, Q. Xue // *Educational Technology & Society*. – 2021. – Vol. 24, № 3. – P. 238–255.

References

1. Bogolyubov, A.N. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya* [Fundamentals of mathematical modeling]. Moscow: Moscow State University, 2005. 220 p. (In Russian).
2. Bulavin, L.A., Vygoritskiy, N.V., Lebovka, N.I. *Komp'yuternoe modelirovanie fizicheskikh sistem* [Computer modeling of physical systems]. Dolgoprudny: Intellect, 2011. 352 p. (In Russian).
3. Vaganova, O.I. *Vozmozhnosti oblachnykh tekhnologiy v elektronnom obuchenii* [Cloud technology capabilities in e-learning] / O.I. Vaganova [et al.]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2017, no. 6–2, pp. 183–187. (In Russian).
4. Vasilishina, N.V. *Primenenie metoda komp'yuternogo modelirovaniya v obuchenii matematike* [Application of the computer modeling method in teaching mathematics] / N.V. Vasilishina. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Adyge State University], 2016, no. 2 (178), pp. 62–67. (In Russian).
5. Veretin, R.S. *Analiz effektivnosti tsifrovyykh obrazovatel'nykh platform s podderzhkoy iskusstvennogo intellekta* [Analysis of the effectiveness of digital educational platforms supported by artificial intelligence]. Moscow: MGPU, 2025. 98 p. (In Russian).
6. Danilov, O.E. *Uchebnaya komp'yuternaya model' sistemy svyazannykh ostsillyatorov* [Educational computer model of a system of coupled oscillators] / O.E. Danilov. *Distsionnoe i virtual'noe obucheniye* [Distance and Virtual Learning], 2017, no. 4 (118), pp. 116–121. (In Russian).
7. Dobritsa, V.P., Goryushkin, E.I. *Primenenie intellektual'noy adaptivnoy platformy v obrazovanii* [Application of an intelligent adaptive platform in education]. Auditorium. Kursk State University, 2019, no. 1 (21), pp. 23–30. (In Russian).
8. Kashina, O.A. *Sistema upravleniya obucheniem kak osnova organizatsii elektronnoho obucheniya v vuzye* [Learning management system as a basis for organizing e-learning at a university] / O.A. Kashina. *Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo* [Educational Technology & Society], 2018, no. 2, pp. 431–438. (In Russian).
9. Klinachev, N.V. *Osnovy modelirovaniya sistem* [Fundamentals of systems modeling]. Moscow: Akademiya, 2000. 321 p. (In Russian).
10. Kochetkova, T.O., Karnaukhova, O.A. *Adaptivnaya obrazovatel'naya strategiya obucheniya matematike studentov v elektronnoy srede* [Adaptive educational strategy for teaching mathematics to students in an electronic environment]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.P. Astaf'eva* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafiev], 2018, no. 2, pp. 50–56. (In Russian).
11. Kulikova, E.A. *Podgotovka v protsesse obucheniya k budushchey professional'noy deyatel'nosti v usloviyakh neopredelennosti* [Preparing during education for future professional activity under uncertainty]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern Scientific Research and Innovation], 2016, no. 12 (68), pp. 1123–1130. (In Russian).
12. Lebedeva, A.A., Garashchenko, A.A., Sidorov, D.N. *Prognoz prostranstvenno-vremennoy dinamiki s primeneniem mashinnogo obucheniya* [Forecasting spatio-temporal dynamics using machine learning]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2025, no. 3, pp. 22–37. (In Russian).
13. Medyankina, E.L., Kurkurin, N.D. *Model' adaptivnogo intellektual'nogo obucheniya bakalavrov tekhnicheskogo profilya* [Model of adaptive intelligent learning for technical bachelor students]. *Sistemnaya inzheneriya i infokommunikatsii* [System Engineering and Infocommunications], 2025, no. 3, pp. 15–26. (In Russian).
14. Pyrin, A.V. *Vybor algoritma programmirovannogo obucheniya v ramkakh problemy klipovogo myshleniya sovremennykh shkol'nikov* [Choosing a programmed learning algorithm in the context of modern schoolchildren's clip thinking]. *Alleya nauki* [Alley of Science], 2019, no. 1 (28), pp. 888–891. (In Russian).
15. Rybtsova, L.L. *Sovremennye obrazovatel'nye tekhnologii: uchebnoe posobie* [Modern educational technologies: a textbook] / ed. by L.L. Rybtsova. Yekaterinburg: Ural University Press, 2014. 92 p. (In Russian).
16. Sovetov, B.Ya., Yakovlev, S.A. *Modelirovanie sistem: uchebnik dlya vuzov* [Systems modeling: a textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. 343 p. (In Russian).
17. Tatarnikova, S.A., Chaunina, I.A. *Adaptivnoe obucheniye kak tekhnologiya personalizirovannogo professional'nogo obucheniya* [Adaptive learning as a technology of personalized professional training]. *Ratio et Natura*, 2022, no. 1 (5), p. 16. (In Russian).

18. Baxter, I., Yahin, A., Moura, L., Sant'Anna, M., Bier, L. Clone Detection Using Abstract Syntax Trees. Proceedings of the International Conference on Software Maintenance (ICSM). Bethesda, MD, USA, 1998, pp. 368–377.
19. Brusilovsky, P. Adaptive educational hypermedia: from generation to generation. Proceedings of the 4th Hellenic Conference on Information and Communication Technologies in Education. Athens, Greece, 2004, pp. 19–33.
20. Kabudi, T., Pappas, I., Olsen, D.H. AI-enabled adaptive learning systems: A systematic mapping of the literature. Computers and Education: Artificial Intelligence, 2021, vol. 2, art. 100017.
21. Kytmanov, A.A., Noskov, M.V., Safonov, K.V., Savelyeva, M.V., Shershneva, V.A. Competency-based Learning in Higher Mathematics Education as a Cluster of Efficient Approaches. Bolema: Mathematics Education Bulletin, 2016, vol. 30, no. 56, pp. 1113–1126.
22. Li, F., He, Y., Xue, Q. Progress, challenges and countermeasures of adaptive learning: A systematic review. Educational Technology & Society, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 238–255.

Маълумот дар бораи муаллиф:

Муродов Маскурбек Келдибекович, муаллими калон, Донишгоҳи давлатии ҳуқуқ, бизнес ва сиёсати Тоҷикистон. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2025-8058>. E-mail: maskurbek_murodzoda@mail.ru

Сведения об авторе:

Муродов Маскурбек Келдибекович, старший преподаватель, Таджикский государственный университет права, бизнеса и политики. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2025-8058>. E-mail: maskurbek_murodzoda@mail.ru

Information about the author:

Maskurbek Murodov, Senior Lecturer, Tajik State University of Law, Business and Politics. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2025-8058>. E-mail: maskurbek_murodzoda@mail.ru