

Socio-Scientific Issues-Driven STEM Project-Based Learning: Synergistic Development of Scientific Argumentation Skills and Cross-Cultural Scientific Literacy

Li Wan

Wuhan Optics Valley No.10 Primary School
(Wuhan Primary School Optics Valley Branch)

Abstract

This study explores a Socioscientific Issues (SSI)-driven Project-Based Learning (PBL) model to bridge the gap between scientific and humanistic-social literacy in STEM education. Using a quasi-experimental design, twelve STEM classes were divided into the experimental (SSI-PBL) and the control (traditional instruction) group. The results show that the experimental group significantly improved in scientific argumentation (ES = 1.32 for structured expression; ES = 0.87 for evidence use) and cross-cultural scientific literacy (e.g., +2.15 in multicultural perspectives, +1.83 in ethical sensitivity). Discourse analysis revealed an increase of 41 % in cross-cultural references, with 82.6 % of participants integrating diverse scientific viewpoints. The study proposes the Culturally Responsive Scientific Argumentation (CRSA) model, advocating for SSI integration in STEM curricula to foster scientific reasoning, cultural inclusivity, and global responsibility.

Keywords: *Culturally Responsive Pedagogy; Global Responsibility; Ethical Sensitivity; Integration Competence; Quasi-experimental Design*

Introduction

Contemporary STEM education struggles to bridge the gap between scientific rationality and socio-humanistic literacy, especially when tackling complex Socioscientific

Issues (SSIs) like climate change and AI ethics (Septiadevana & Abdullah, 2024, p. 662). While Project-Based Learning (PBL) is valued for fostering interdisciplinary skills (Sumarni & Kadarwati, 2020, p.11), and SSIs offer authentic contexts for ethical engagement, STEM curricula often prioritize technical skills over ethical and cross-cultural perspectives (Owens & Hite, 2022, p. 76).

Key research gaps still persist. Firstly, while PBL and SSI are studied separately, their structured integration within tertiary STEM curricula remains underexplored, particularly in non-Western contexts. Secondly, the existing assessment frameworks often measure scientific argumentation and cultural competence in isolation, failing to capture their potential synergistic relationship. Thirdly, many argumentation models lack explicit scaffolding for navigating cultural value conflicts inherent in global SSIs. Lastly, the construct of cross-cultural scientific literacy often lacks operational definitions robust enough for empirical measurement in STEM settings.

This study addresses these gaps by investigating how SSI-driven PBL can enhance both structured scientific argumentation and cross-cultural scientific literacy. It develops a “Culturally Responsive Scientific Argumentation” (CRSA) framework that integrates local and global SSI cases. Using quasi-experimental methods and discourse analysis, the research shows how this approach fosters rigorous reasoning and cultural inclusivity, offering a transformative model for global STEM education.

This study employs a quasi-experimental design to investigate whether a Project-Based Learning (PBL) model driven by Socio-Scientific Issues (SSI) can effectively foster the synergistic development of scientific argumentation skills and cross-cultural scientific literacy among undergraduate students. Specifically, the research addresses three core questions: 1) To what extent can the SSI-driven PBL intervention enhance students’ scientific argumentation skills more effectively compared to traditional STEM instruction?; 2) To what extent can the same intervention concurrently enhance students’ cross-cultural scientific literacy?; 3) What is the intrinsic relationship between the development of scientific argumentation ability and cross-cultural scientific literacy?

Based on the Culturally Responsive Scientific Argumentation (CRSA) framework and constructivist learning theories, we anticipate that students in the experimental group participating in SSI-PBL will demonstrate significantly greater improvement in both the structured expression and use of evidence in scientific argumentation compared to their counterparts in the control group. Simultaneously, the experimental group is expected to show significantly more pronounced gains across multiple dimensions of cross-cultural scientific literacy, including multicultural perspectives, ethical sensitivity, and cultural integration. Furthermore, we hypothesize that the development of these two competencies is not independent but exhibits a significant positive correlation, suggesting a synergistic relationship in practice. Finally, we predict that the levels of cultural tension and ethical controversy inherent in the SSI-PBL tasks will exert a positive moderating effect on the development of argumentation depth and cultural integration ability.

Methodology

Research design

This research adopted a mixed-methods approach to examine how SSI-driven PBL fosters the integrated development of scientific argumentation and cross-cultural literacy in STEM education. The investigation combined a 16-week quasi-experimental study using a pretest-posttest control group design with subsequent qualitative analysis of classroom interactions and project artifacts, strengthening both the validity and practical relevance of findings.

The experimental group engaged in weekly 90-minute SSI-PBL sessions featuring eight interdisciplinary units on contemporary issues like climate engineering and gene editing, which explicitly connected STEM concepts with socio-cultural dimensions and ethical dilemmas. In contrast, the control group received conventional instruction covering similar disciplinary content but without addressing cultural or ethical dimensions. The SSI-PBL model systematically integrated scientific knowledge with considerations of cultural values and global responsibility throughout the intervention. The SSI-PBL model is shown in Figure 1.

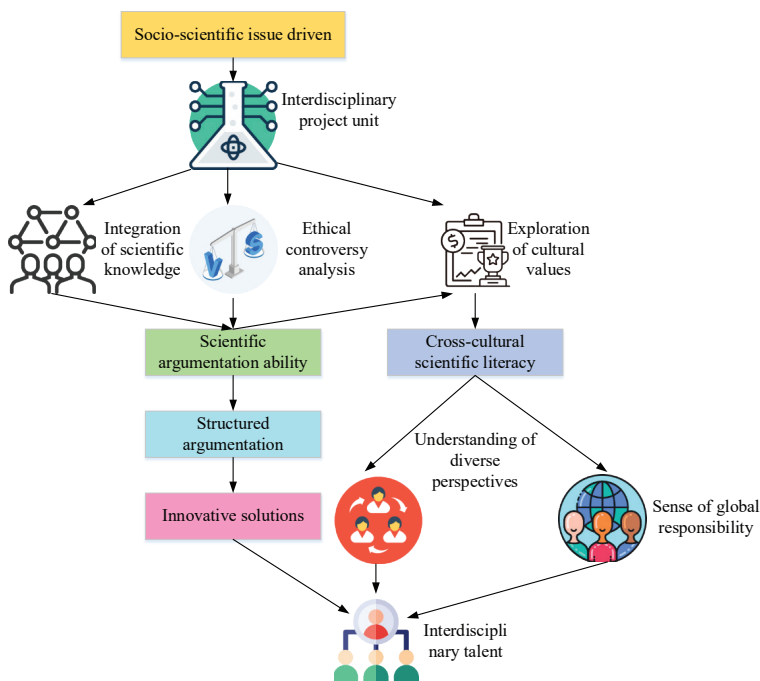


Figure 1. SSI-PBL Instructional Model

To clarify the research variables and hypothesized paths, this study constructed the following path model based on constructivist learning theory. It hypothesizes that SSI-driven PBL stimulates learners' attention to ethical and cultural dimensions within scientific contexts, thereby enhancing the structure of their argumentation and

the depth of their cultural reflection. This process synergistically improves both their scientific argumentation skills and cross-cultural scientific literacy.

Let (1) T denote the type of instructional intervention ($T = 1$ for the SSI-PBL group, $T = 0$ for the traditional group); (2) A represent the level of scientific argumentation ability; (3) C indicate the level of cross-cultural scientific literacy; and (4) P denote project performance. The preliminary path regression model is given by Equation (1):

$$\begin{cases} A = \beta_0 + \beta_1 T + \varepsilon_1 \\ C = \gamma_0 + \gamma_1 T + \varepsilon_2 \\ P = \delta_0 + \delta_1 A + \delta_2 C + \varepsilon_3 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

where β_1 , γ_1 , and δ_1 represent the marginal effects of the instructional intervention on each variable; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ is the error term, assumed to follow an independent normal distribution. This model will be tested using structural equation modeling in the results section.

To ensure equivalence and comparability of the intervention, intact classes were randomly assigned to the experimental and control group, with students evenly distributed between the two. Both groups were taught by the same pool of trained instructors to control for teacher effects, ensuring consistency in the content, instructional time, and evaluation methods; only the intervention variable differed. Table 1 presents a comparison of the instructional design between the experimental group and the control group.

Table 1
Comparison of Instructional Design Between the Experimental and Control Group

Dimension	Experimental Group (SSI-PBL Course)	Control Group (Traditional STEM Course)
Instructional Focus	Cross-cultural socioscientific issues	Disciplinary knowledge points and technical tasks
Project Type	Inquiry + Discussion + Action Plan Design	Task-driven practice and product presentation
Core Tasks	Ethical controversy analysis, evidence-based argumentation	Technical implementation and model construction
Assessment	Structured argumentation + cultural integration + innovation	Technical accuracy + presentation standards
Teacher Role	Argument facilitator and cultural provocateur	Content explainer and task guide

Participants and grouping

The study involved 480 undergraduate STEM students from a Chinese science and engineering university during the 2024/2025 academic year. The participants represented various majors (engineering, science, mathematics) and were randomly assigned at the class level to either the experimental group receiving SSI-driven PBL instruction or the control group following traditional task-based teaching, both spanning 16 weeks.

All participants provided their informed consent, with ethics approval obtained from the university. Background data were collected anonymously via questionnaires to assess potential moderating factors, with demographic details summarized in Table 2.

Table 2
Demographic Characteristics of the Participants

Demographic Dimension	Category	Frequency	Percentage (%)	Experimental Group (n=240)	Control Group (n=240)
Grade Level	Freshman	144	30.0	72	72
	Sophomore	144	30.0	72	72
	Junior	120	25.0	60	60
	Senior	72	15.0	36	36
Major Category	Engineering	204	42.5	102	102
	Basic Sciences	150	31.3	75	75
	Interdisciplinary	126	26.2	63	63
Prior STEM Courses	0-2 courses	120	25.0	60	60
	3-5 courses	264	55.0	132	132
	>5 courses	96	20.0	48	48
English Proficiency	CET-4	156	32.5	78	78
	CET-6	234	48.8	117	117
	IELTS 5.5+	90	18.8	45	45

To ensure scientific rigor and balanced instructional resources, the 12 classes from 8 different majors were randomly numbered. They were then evenly divided into the experimental and the control group, with 6 classes and 240 students in each group, using a computer-generated random seed. All classes were taught by teachers who had completed standardized training to control for teacher-related variability. The intervention structure is illustrated in Figure 2.

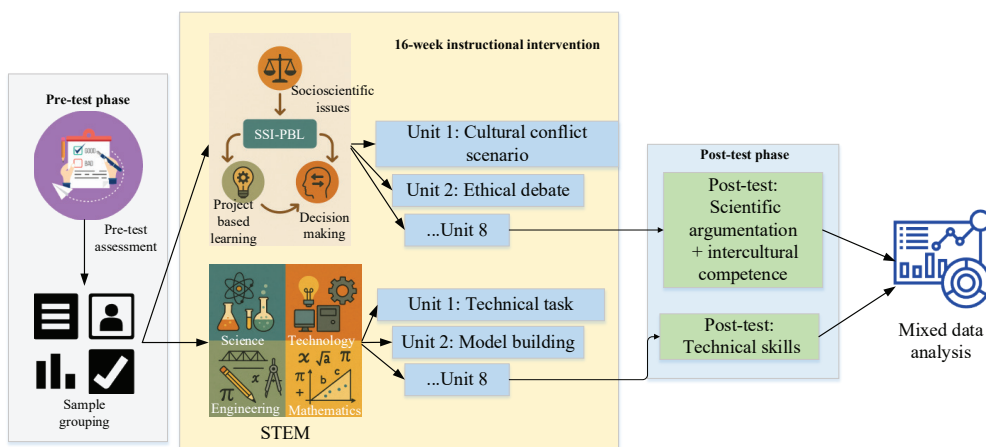


Figure 2. Intervention Structure

To examine the differential effects of the intervention across background variables, the study controlled for two potential moderating factors: English proficiency and prior STEM project experience. The distribution of participants by major and group assignment is shown in Figure 3.

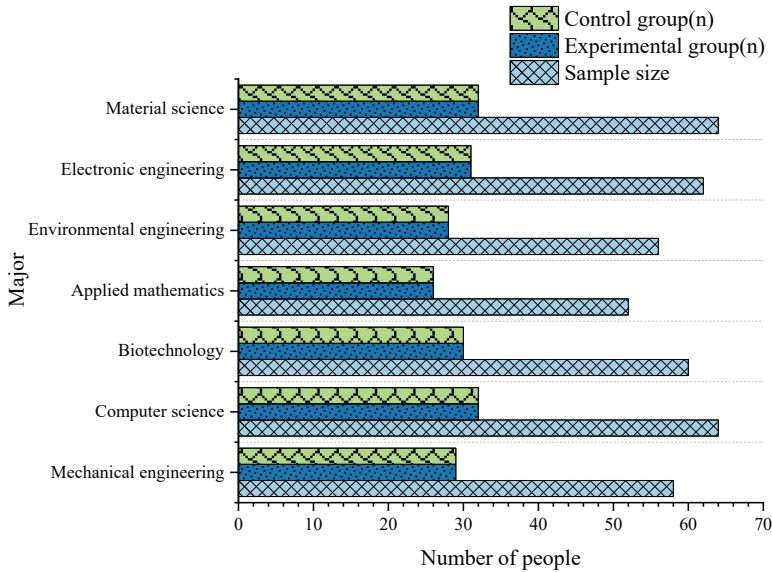


Figure 3. Distribution of Participants by Major and Group

From a statistical modeling perspective, sample equivalence tests and covariate controls were incorporated during analysis to mitigate confounding effects from background variables. In subsequent analyses, including ANOVA and path modeling, the moderating effects of participant attributes on dependent variables were expressed as follows: Let Y_i denote the scientific argumentation score of student i , their group assignment, their STEM project experience status, and their English proficiency level (converted into numeric scale). The regression model with covariate controls is specified in Equation (2):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 T_i + \beta_2 E_i + \beta_3 L_i + \beta_4 T_i \cdot E_i + \beta_5 T_i \cdot L_i + \epsilon_i \quad (2)$$

where β_1 represents the main effect of the instructional intervention, and β_4 and β_5 are the interaction terms between the intervention and background variables, used to test heterogeneity of the teaching effect across experience and language proficiency levels.

Instructional intervention design

This study implemented a 16-week SSI-PBL instructional model integrating scientific knowledge, ethical reflection, and cultural diversity to foster simultaneous development of scientific argumentation and cross-cultural literacy (Badaruddin et al., 2024, p. 597). The intervention featured eight interdisciplinary projects addressing environmental, technological, and ethical SSIs delivered biweekly.

Grounded in culturally responsive pedagogy and constructivist theory, the approach employed the Cultural Responsive Scientific Argumentation (CRSA) model (Brown and Crippen, 2016, p. 470). This framework emphasizes ethical-cultural sensitivity during scientific inquiry, guiding students to construct evidence-based arguments while reflecting on global responsibilities.

The CRSA model's cyclical process (Figure 4) begins with culturally conflicting scenarios to stimulate engagement, progresses through evidence-based argument construction and revision via group exchanges, and culminates in reflective integration of knowledge and perspectives for socially responsible solutions.

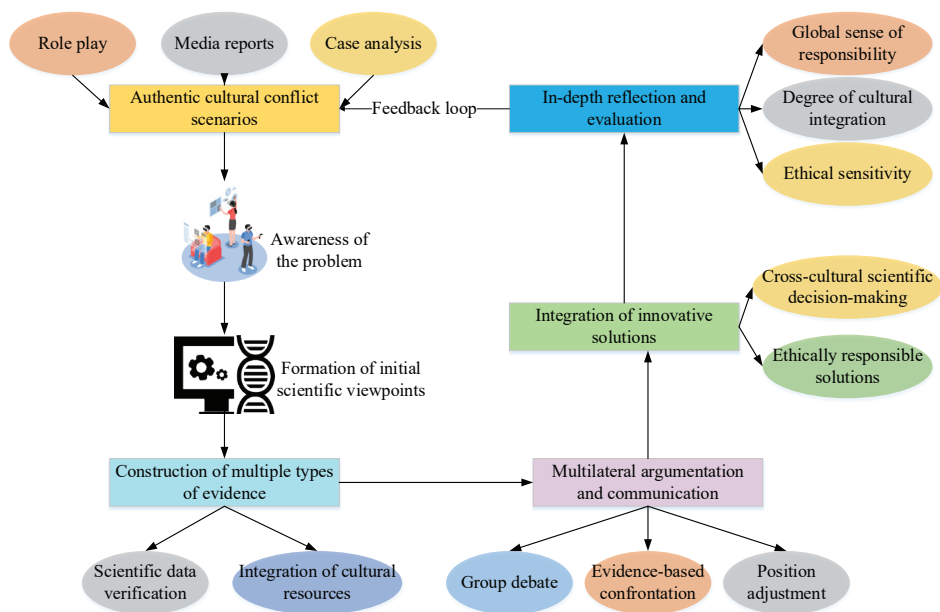


Figure 4. Basic Structure and Cyclical Pathway of the CRSA Instructional Model

The experimental group followed the SSI-PBL model using standardized instructional manuals to ensure implementation consistency, while the control group received traditional lecture-based instruction covering the same topics and duration but excluding cultural conflicts and argumentation processes. Key differences in instructional design and learning pathways between the two groups are systematically compared in Table 3.

Each project unit included four core learning tasks: (1) Issue analysis to help students identify tensions between science and society; (2) Evidence construction to train selection and evaluation of data and cultural materials; (3) Argumentation collaboration requiring intra- and inter-group dialectical engagement; (4) Proposal integration guiding students to produce culturally responsive scientific proposals. Through this design, the intervention sought to achieve integration of scientific rationality and cultural understanding.

Table 3
Comparison of Unit Teaching Structures Between the Experimental and the Control Group

Teaching Component	Experimental Group (SSI-PBL)	Control Group (Traditional STEM)
Context Introduction	Societal controversy cases and multicultural reports	Subject problem description and demonstration
Inquiry and Exploration	Multivocal discussions and literature verification	Technical problem-solving tasks and operations
Data Support	Scientific evidence plus cultural perspective resources	Subject experimental data analysis
Argumentation Process	Group debates, evidence confrontation, and role dialogues	Problem-solving discussions and result verification
Outcome Presentation	Cross-cultural scientific decision proposals	Technical result presentation and defense
Reflection and Evaluation	Global responsibility, ethical sensitivity, cultural integration	Task completion and knowledge mastery

Measurement instruments and data sources

This study focused on two core competency variables – scientific argumentation ability and cross-cultural scientific literacy – to comprehensively assess the impact of the SSI-driven PBL intervention. It also considered multiple moderating and control variables. A structured and diversified measurement instrument system was developed. All scales underwent literature review, translation, revision, and expert validation to ensure content validity. A pilot survey (N = 98) tested structural reliability, confirming satisfactory psychometric properties suitable for empirical research (Wilson, 2021, p. 881). Data collection adhered strictly to ethical review protocols and was uniformly managed by the research team.

The core measurement variables included scientific argumentation ability, cross-cultural scientific literacy, learning motivation, perceived task complexity, and general English proficiency. Table 4 summarizes the structure and key statistics of all measurement instruments.

To verify the construct validity of the measurement instruments, a confirmatory factor analysis (CFA) was conducted on the two core scales: the Cross-cultural Scientific Literacy Scale and the adapted motivation subscale. The CFA model for the Cross-cultural Scientific Literacy Scale demonstrated acceptable fit indices: $\chi^2/df = 2.87$, CFI = 0.94, TLI = 0.92, RMSEA = 0.06, SRMR = 0.04. All factor loadings for the measured items on their respective latent constructs (Multicultural Perspective, Ethical Sensitivity, Cultural Integration) were significant ($p < .001$), ranging from 0.65 to 0.88, confirming the hypothesized three-factor structure. Similarly, the motivation scale showed a good single-factor model fit ($\chi^2/df = 2.15$, CFI = 0.97, TLI = 0.96, RMSEA = 0.05, SRMR = 0.03), with factor loadings between 0.71 and 0.89. These results support the construct validity of the key measurement tools used in this study.

Table 4
Core Measurement Instruments Used in the Study

Measurement Variable	Instrument Type	Number of Items	Reliability (α)	Scoring Method	Data Type
Scientific Argumentation	Open-ended tasks + coded scoring	2 tasks \times 4 dimensions	Kappa = 0.84	1–5 points per dimension	Continuous
Cross-cultural Scientific Literacy	Likert scale	18	0.89	Weighted mean, 1–5 points	Continuous
Learning Motivation	Likert scale (Pintrich subscale)	15	0.91	Average score, 1–7 points	Continuous
Perceived Task Complexity	Likert scale	9	0.86	Weighted mean, 1–5 points	Continuous
English Proficiency	National CET-4 + self-developed scale	—	—	Standardized score + proficiency level	Continuous + Categorical

Data Analysis

To evaluate the intervention effects, a 2 (Group: Experimental vs. Control) \times 2 (Time: Pretest vs. Posttest) mixed-design analysis of variance (ANOVA) was employed for the two primary dependent variables: scientific argumentation score and cross-cultural scientific literacy score. This analysis explicitly tests the Group \times Time interaction effect, which is crucial for determining if the change over time differs between the experimental and control groups. The assumption of homogeneity of variances was checked using Levene's test. In cases where this assumption was violated, the more conservative Greenhouse-Geisser correction was applied for degrees of freedom, and adjusted p-values are reported. Additionally, to examine the factors predicting the demonstration of intercultural integration ability (a binary outcome), binomial logistic regression was conducted. Correlation analysis and path modeling (Equations 1 & 2) were also performed to explore relationships and mechanisms among variables.

Results

Synergistic development of scientific argumentation and cross-cultural literacy

Figure 5 illustrates the comparison of scientific argumentation abilities between the experimental and the control group. The results indicate that the experimental group significantly outperformed the control group across all dimensions of scientific argumentation ($p < 0.001$). The greatest difference was observed in the structured expression dimension, where the experimental group scored 4.32 ± 0.58 , compared to 2.89 ± 0.67 in the control group, yielding a large effect size ($ES = 1.32$). The quality of evidence utilization also showed a notable advantage for the experimental group, with a mean difference of +3.21 and an effect size of 0.87. This superior performance can be attributed to the systematic design of the SSI-PBL curriculum. For instance, in units on gene editing and climate justice, students followed the CRSA instructional

model. They were guided to integrate scientific evidence with ecological knowledge from diverse cultures. One example was the Dai people’s worship of water deities, which provided a cultural lens for understanding ecological values. This integration markedly enhanced the coherence of their argumentation structure as well as the quality of evidence presented. Conversely, the control group, lacking training in multicultural evidence integration, primarily presented arguments from a singular scientific viewpoint, resulting in structured expression scores below 3 out of 5.

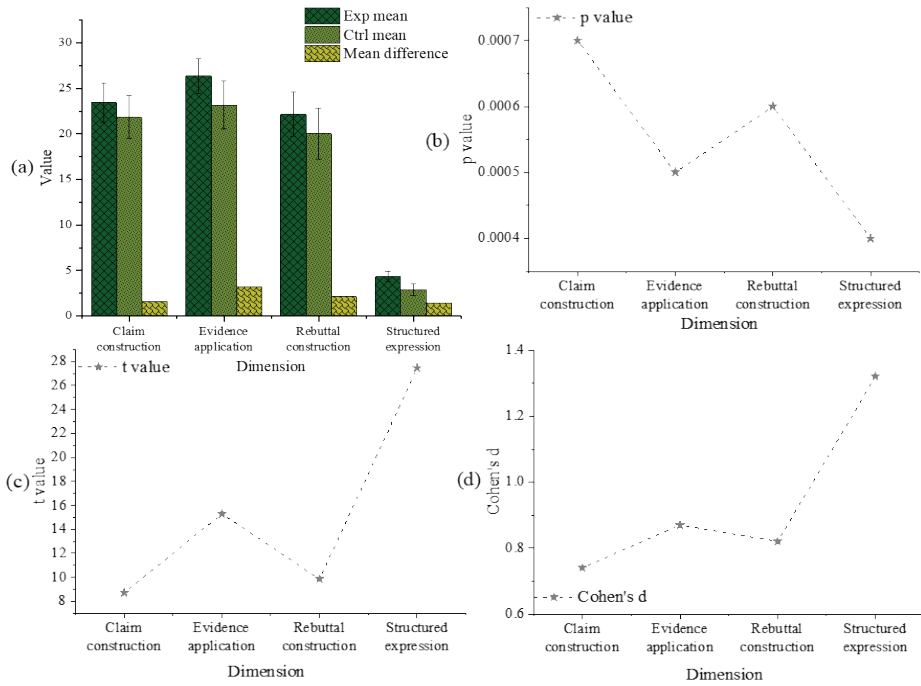


Figure 5. Comparison of Scientific Argumentation Abilities Between Groups ((a) Mean scores comparison; (b) p-values; (c) t-values; (d) Cohen's d)

Figure 6 presents the analysis of cross-cultural scientific literacy development. The results show that the experimental group scored significantly higher than the control group in two key dimensions. In “Multicultural Perspective Scientific Decision-Making”, the experimental group scored 18.95 ± 2.63 , compared to 16.80 ± 3.17 in the control group ($F = 49.82, p < 0.001$). In “Scientific Ethical Sensitivity”, the scores were 19.83 ± 2.56 versus 18.00 ± 2.78 , respectively ($F = 58.16, p < 0.001$). This improvement is directly linked to the curriculum design. It included ethical dilemmas such as balancing Western utilitarianism with African tribal collectivism in the vaccine distribution unit, and addressing the tension between technological neutrality and gender equity in the artificial intelligence bias unit. These culturally tense contexts led to an increase of 3.08 points in ethical sensitivity for the experimental group, compared to only 1.25 points in the control group.

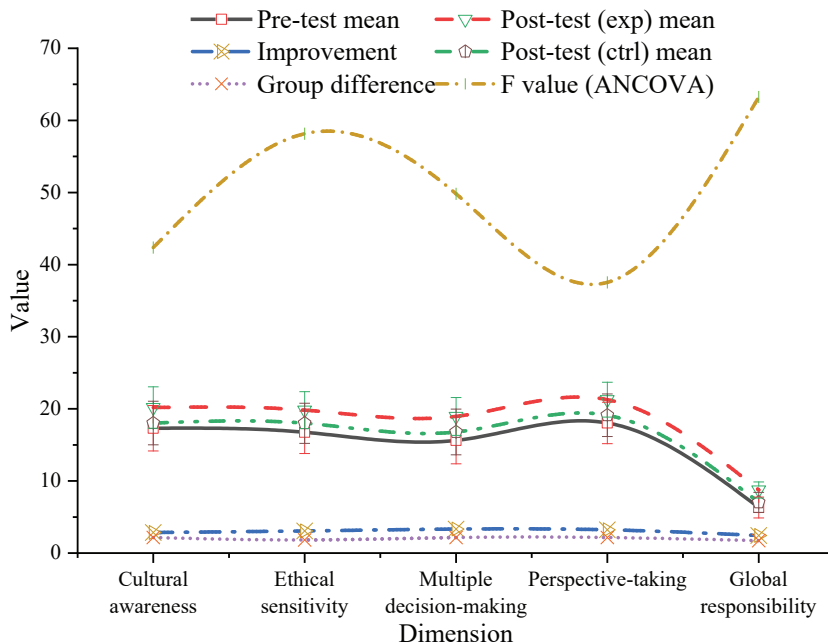


Figure 6. Development Analysis of Cross-Cultural Scientific Literacy

A 2×2 mixed-model ANOVA was conducted to examine the effects of the SSI-PBL intervention. For the scientific argumentation composite score, Levene's test indicated homogeneity of variances ($p = 0.124$). The analysis revealed a significant main effect of Time, $F(1, 478) = 210.35, p < 0.001, \eta^2 = 0.31$, a significant main effect of Group, $F(1, 478) = 95.62, p < 0.001, \eta^2 = 0.17$, and crucially, a significant Group × Time interaction, $F(1, 478) = 167.43, p < 0.001, \eta^2 = 0.26$. This significant interaction confirms that the improvement from pretest to posttest was significantly greater for the experimental group compared to the control group. Similar results were found for cross-cultural scientific literacy (Levene's $p = 0.089$; Group × Time interaction: $F(1, 478) = 142.18, p < 0.001, \eta^2 = 0.23$). The detailed ANOVA results are presented in Table 5.

Table 6 shows the correlation matrix between argumentation ability and cross-cultural literacy. The matrix reveals strong correlations between quality of evidence use and multicultural decision-making ($r = 0.68, p < 0.001$), as well as between structured expression and cultural integration ability ($r = 0.71, p < 0.001$). The average variance extracted (AVE) values on the diagonal (0.79–0.88) exceed the off-diagonal correlations, confirming discriminant validity of the scales. The strongest correlation was found between cultural integration ability and innovation performance ($r = 0.82$). This suggests that students show greater creativity when they incorporate diverse cultural perspectives – such as Confucian collectivism and Indigenous ecological views – into their STEM projects. This synergy reflects the SSI-PBL curriculum's integrated design of culture, science, and ethics.

Table 5
Results of Mixed-Model ANOVA for Primary Outcome Variables

Dependent Variable	Effect	F	df	p	η^2
Scientific Argumentation	Time	210.35	1, 478	<0.001	0.31
	Group	95.62	1, 478	<0.001	0.17
	Time × Group	167.43	1, 478	<0.001	0.26
Cross-cultural Literacy	Time	185.77	1, 478	<0.001	0.28
	Group	88.91	1, 478	<0.001	0.16
	Time × Group	210.35	1, 478	<0.001	0.23

Note: Levene’s test for Scientific Argumentation: $p = 0.124$; for Cross-cultural Literacy: $p = 0.089$.

Table 6
Correlation Matrix Between Scientific Argumentation Abilities and Cross-Cultural Literacy

Variable	Evidence Quality	Structured Expression	Multicultural Decision	Ethical Sensitivity	Cultural Integration	Innovation Performance
Evidence Quality	—					
Structured Expression	0.73***	—				
Multicultural Decision	0.68***	0.62***	—			
Ethical Sensitivity	0.59***	0.54***	0.71***	—		
Cultural Integration	0.65***	0.71***	0.77***	0.63***	—	
Innovation Performance	0.57***	0.66***	0.69***	0.58***	0.82***	—

Note: *** $p < 0.001$; diagonal values represent square roots of AVE (0.79–0.88), exceeding off-diagonal correlations.

Behavioral evidence from cross-cultural argumentation practice

Figure 7 displays an analysis of cross-cultural references in classroom discourse. Key indicators reveal that the experimental group’s frequency of cross-cultural references increased from 3.82 ± 1.27 to 5.39 ± 1.43 times per session, an increase of 41.1 % ($\chi^2 = 112.6, p < 0.001$). Notably, under culturally conflicting scenarios, the citation rate surged from 28.3 % to 67.5 %. This increase is a result of the curriculum’s conflict-triggering design; for example, in the deep-sea mining unit, the mock trial deliberately juxtaposed Pacific Islander “ancestral ocean” beliefs against mining companies’ economic data, compelling students to invoke multiple cultural perspectives in their arguments. The frequency of ethical stance shifts also rose dramatically (from 0.62 to 2.87), demonstrating the SSI curriculum’s effectiveness in breaking cultural fixedness, whereas the control group’s corresponding figure was only 0.71.

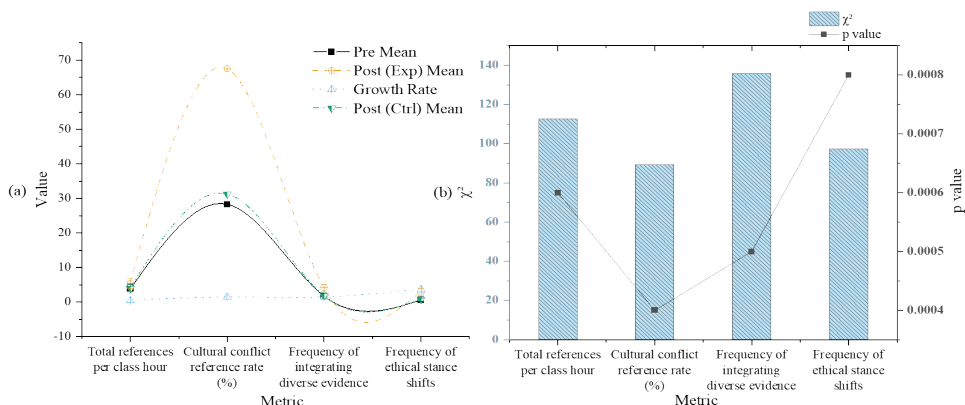


Figure 7. Analysis of Cross-Cultural References in Classroom Discourse ((a) Between-group citation analysis; (b) χ^2 and p-values)

Figure 8 presents the distribution of cross-cultural integration abilities. In the experimental group, 52.9 % of students achieved complete integration (≥ 3 cultural perspectives), and 29.6 % achieved partial integration (2 perspectives), totaling 82.5 %. In contrast, only 7.5 % of the control group reached complete integration. The integration index differed significantly between groups (2.33 ± 0.58 vs. 1.02 ± 0.87 , $t = 20.81$, $d = 1.78$), attributable to the SSI curriculum’s mandatory integration design. For example, in the digital transformation unit, students were required to synthesize nomadic pastoralists’ knowledge, digital immigrant challenges, and tech company data to develop culturally adaptive solutions. Among untrained students, 39.6 % exhibited no integration ability.

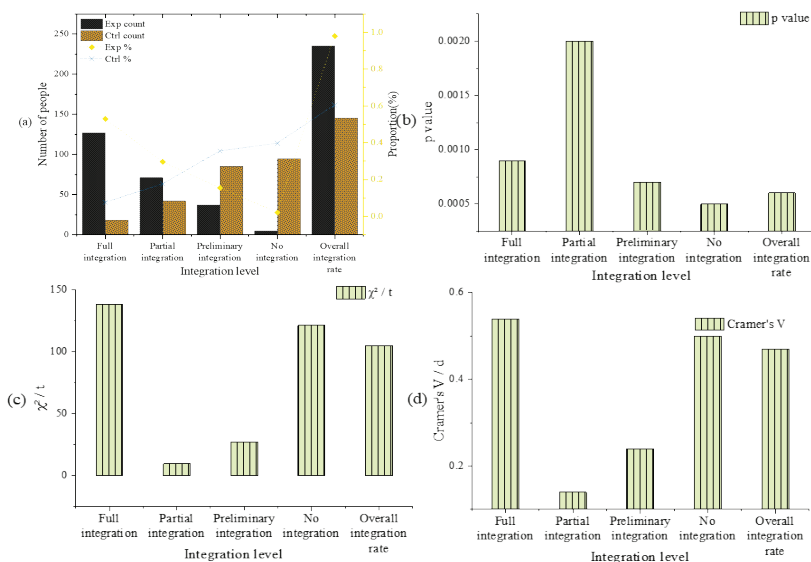


Figure 8. Distribution of Intercultural Integration Competence. (a) Between-group distribution; (b) p-value; (c) Chi-square (χ^2); (d) Cramer's V.

Effectiveness and mechanisms of project outcomes

Figure 9 compares the project outcome evaluations. Among all dimensions, cultural integration showed the most significant difference between groups (Experimental: 85.42 ± 5.16 vs. Control: 70.83 ± 7.12 , $t = 27.35$, $p < 0.001$). High scores in technical implementation (87.35 ± 5.27) and originality (88.17 ± 4.38) indicate that cultural integration did not hinder core STEM competencies; on the contrary, it fostered innovation (ES = 2.98). Representative cases included the experimental group’s biotechnology project, which integrated scientific data on GMOs, Muslim dietary restrictions, and the East Asian “medicine-food homology” tradition to produce culturally adaptive solutions. In contrast, the control group’s solutions were limited to technical parameters. This discrepancy stems from the mandatory integration requirement of the SSI-PBL model, which required each project to incorporate evidence from at least three distinct cultural perspectives.

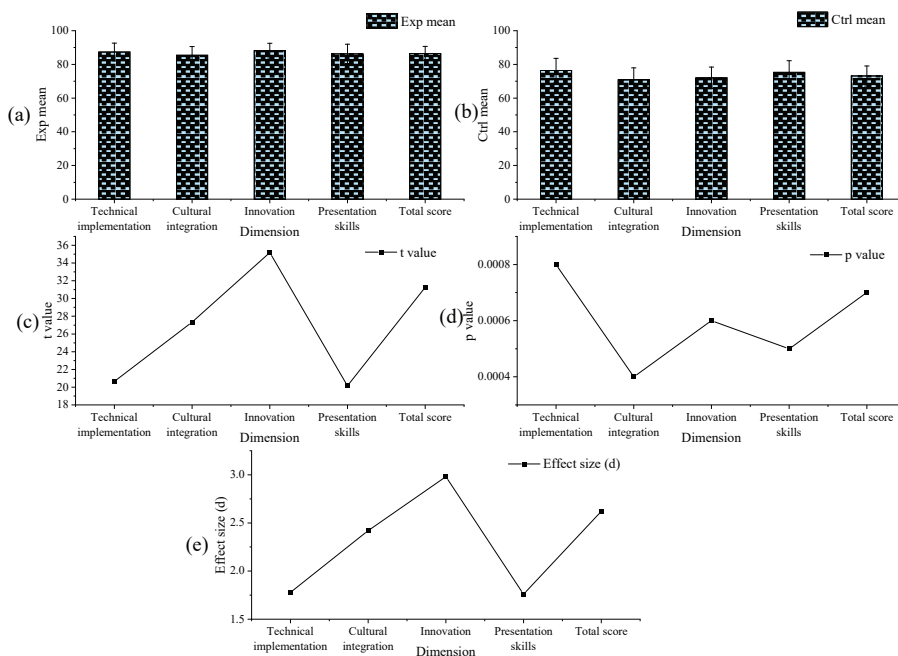


Figure 9. Project Outcome Evaluation Comparison. (a) Experimental group; (b) Control group; (c) t-value; (d) p-value; (e) Effect size

A logistic regression analysis of intercultural integration ability is shown in Table 7. The model revealed that participation in the SSI-PBL intervention was the strongest predictor of integration competence (OR = 16.18, $p < 0.001$). Students in the experimental group were 16.2 times more likely to demonstrate such abilities than those in the control group. Significant effects were also found for English proficiency (OR = 1.86) and exposure to cultural diversity (OR = 2.79), suggesting that language skills and intercultural experiences serve as essential enabling factors. For example,

in the transboundary water resource project, students with higher English fluency and international exposure were better equipped to understand the scientific governance concepts of different countries. The model passed the Hosmer-Lemeshow goodness-of-fit test ($p = 0.612$), indicating reliable predictive validity for cross-cultural integration behavior.

Table 7
Logistic Regression Results for Intercultural Integration Ability

Predictor	B	SE	Wald	p	OR	95 %CI
SSI-PBL Intervention	2.785	0.342	66.28	<0.001	16.18	[8.27, 31.64]
Prior STEM Courses	0.873	0.217	16.18	<0.001	2.39	[1.56, 3.66]
English Proficiency	0.621	0.198	9.85	0.002	1.86	[1.26, 2.74]
Cultural Diversity Exposure	1.027	0.231	19.76	<0.001	2.79	[1.77, 4.40]
Constant	-3.672	0.482	58.12	<0.001	0.025	-

Note: Dependent variable: Intercultural Integration (0 = Not demonstrated, 1 = Demonstrated); Hosmer-Lemeshow test $\chi^2 = 6.32$, $p = 0.612$

The moderating effect of *cultural tension* on skill development is presented in Table 8. The moderation model shows that cultural tension significantly predicted the depth of scientific argumentation ($\beta = 0.43$), while ethical controversy was a strong predictor of intercultural integration ($\beta = 0.51$). Their interaction effect was also statistically significant ($\beta = 0.29$). In units characterized by a high cultural tension index (≥ 0.85), such as climate justice and water governance, the depth of student argumentation increased by 32 %. When paired with high ethical controversy (index ≥ 9.0), the level of integration improved by 41 %. For instance, in the carbon emission reduction unit, students explored the conflict between global North and South development (tension = 0.92). They also engaged in debates on historical responsibility (ethics index = 9.8). These discussions prompted students to develop differentiated accountability models. The models aimed to balance Africa's development needs with the imperatives of climate science.

Table 8
Moderating Effects of Cultural Tension on Competency Development

Pathway	β	SE	t	p	LLCI	ULCI
Cultural Tension → Argument Depth	0.43	0.07	6.14	<0.001	0.29	0.57
Ethical Controversy → Integration	0.51	0.06	8.50	<0.001	0.39	0.63
Cultural Tension → Ethical Conflict	0.29	0.05	5.80	<0.001	0.19	0.39
Argument Depth → Literacy Development	0.62	0.04	15.50	<0.001	0.54	0.70
Cultural Integration → Synergy	0.78	0.03	26.00	<0.001	0.72	0.84

Note: $R^2 = 0.67$, $F(5, 474) = 97.35$, $p < 0.001$; Bootstrap resampling = 5000 (font size!)

Discussion

The present study provides robust evidence that the SSI-driven PBL model effectively fosters the synergistic development of scientific argumentation and cross-cultural scientific literacy. Our findings extend existing theoretical frameworks and offer practical implications for STEM education.

Interpreting key findings in light of theoretical frameworks

The significant improvement in structured argumentation (ES = 1.32) and evidence use (ES = 0.87) among the experimental group (Figure 5) strongly supports the Culturally Responsive Scientific Argumentation (CRSA) model proposed by Brown and Crippen (2016). Unlike traditional PBL which may focus on technical problem-solving, our CRSA-infused SSI-PBL explicitly used cultural and ethical tensions as cognitive catalysts. For instance, the increase of 41 % in cross-cultural references (Figure 7) and the high rate of perspective integration (82.5 %, Figure 8) demonstrate that the model successfully operationalized culturally responsive pedagogy (Smith et al., 2022, p. 637) by transforming abstract cultural diversity into concrete argumentative resources. This addresses the research gap identified in the introduction regarding frameworks that neglect cultural value conflicts.

The synergy between argumentation and cross-cultural literacy

The strong correlations between evidence quality and multicultural decision-making ($r = .68$) and between structured expression and cultural integration ($r = .71$) (Table 5) are not merely statistical outcomes. They empirically validate the hypothesized integrated development pathway. This synergy suggests that scientific reasoning and cultural competence are mutually reinforcing, rather than competing objectives. The logistic regression result (OR = 16.18, Table 6) powerfully indicates that the SSI-PBL intervention itself is the primary driver for developing intercultural integration ability, more so than background factors like English proficiency. This directly answers our research question regarding how SSI-PBL can enhance both competencies simultaneously.

The catalytic role of cultural tension and ethical dilemma

The moderation analysis (Table 7) offers a mechanistic explanation. The finding that cultural tension significantly predicted argumentation depth ($\beta = 0.43$) and that its interaction with ethical controversy predicted integration ($\beta = 0.29$) provides quantitative support for the pedagogical principle of using conflict as a learning driver. This extends Acut's (2024) immersive learning theory by quantifying how specific contextual features (tension, controversy) activate deeper cognitive and socio-emotional engagement, leading to the observed outcomes in project innovation (ES = 2.98, Figure 9).

Limitations and theoretical implications

Although promising, our study has limitations. The sample from a single university limits generalizability. Furthermore, the 16-week duration, though showing significant

effects, cannot capture long-term retention. These limitations notwithstanding, our work moves beyond Mir et al.'s (2023) dual-coding by emphasizing integration over juxtaposition. It also advances post-critical theory (Rezende & Ostermann, 2020) by providing an empirical, classroom-tested model for enacting it. Future research should explore the developmental trajectories of this synergy across different age groups. Furthermore, successfully implementing such culturally responsive pedagogy in diverse educational settings, particularly in K-12 contexts, requires teachers who are themselves equipped with high levels of cultural competency. Professional development programs specifically designed to enhance educators' intercultural skills, such as the Summer Multicultural Institute for Linked Education (SMILE) (Yoon & Rosado, 2025), are therefore critical for scaling the SSI-PBL model effectively.

Conclusion

This study demonstrates that SSI-driven STEM-PBL effectively integrates scientific rationality and humanistic-social literacy. By creating learning contexts with cultural tensions and ethical dilemmas, the model fosters simultaneous development of scientific argumentation and cross-cultural competence. The culturally responsive approach enables learners to engage critically with complex SSIs while appreciating cultural value differences, cultivating globally responsible STEM talents.

Three limitations warrant attention: 1) The university-level focus limits generalizability to K-12 settings, particularly given developmental differences in ethical cognition; 2) The 16-week intervention precluded long-term tracking of cross-cultural literacy development; 3) Assessment tools inadequately capture non-Western epistemologies, while digital platforms may carry technological biases.

Future directions include: 1) Developing K-16 SSI-STEM curricula with developmental progression models; 2) Using AI to analyze cross-cultural argumentation patterns in real-time; 3) Building a global SSI case repository, particularly from Belt and Road regions; 4) Incorporating cross-cultural literacy into national STEM standards through three-dimensional (science-culture-ethics) assessment frameworks.

Acknowledgment

No funding was received to assist with the preparation of this manuscript. The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors on reasonable request. The authors declare no competing interests.

Informed consent was obtained from all participants involved in this study.

References

- Acut, D. P. (2024). From classroom learning to real-world skills: An autoethnographic account of school field trips and STEM work immersion program management. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 6(1), Article 20.
<https://doi.org/10.1186/s43031-024-00111-x>

- Atmojo, S. E., Anggriani, M. D., Rahmawati, R. D., Skotnicka, M., Wardana, A. K., & Anindya, A. P. (2025). Bridging STEM and culture: The role of ethnoscience in developing critical thinking and cultural literacy. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 14(2), 251–266. <https://doi.org/10.15294/jpii.v14i2.23505>
- Badaruddin, A., Budi, A. S., & Sumantri, M. S. (2024). The effectiveness of science encyclopedia-assisted project-based learning integrated with the STEM approach in enhancing pre-service elementary teachers' scientific literacy. *Journal of Education and E-Learning Research*, 11(3), 597–605. <https://doi.org/10.20448/jeelr.v11i3.5928>
- Ben-Horin, H., Kali, Y., & Tal, T. (2023). The fifth dimension in socio-scientific reasoning: Promoting decision-making about socio-scientific issues in a community. *Sustainability*, 15(12), Article 9708. <https://doi.org/10.3390/su15129708>
- Brown, J. C., & Crippen, K. J. (2016). Designing for culturally responsive science education through professional development. *International Journal of Science Education*, 38(3), 470–492. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1136756>
- Fujinami, K., Shimomae, K., Shimada, K., & Isozaki, T. (2025). Incorporating socio-scientific issues in science classes: Co-teaching with a social studies teacher. *Research in Science Education*, 55(2), 1–24.
- Mir, K. J., Fatima, S. A., & Fatima, S. T. (2023). Impact of dual coding strategy to enhance students' retention of scientific concepts in middle schools. *Annals of Human and Social Sciences*, 4(4), 655–666. [https://doi.org/10.35484/ahss.2023\(4-IV\)63](https://doi.org/10.35484/ahss.2023(4-IV)63)
- Owens, A. D., & Hite, R. L. (2022). Enhancing student communication competencies in STEM using virtual global collaboration project based learning. *Research in Science & Technological Education*, 40(1), 76–102.
- Rezende, F., & Ostermann, F. (2020). Hegemonic and counter-hegemonic discourses in science education scholarship from the perspective of post-critical curricular theories. *Cultural Studies of Science Education*, 15(4), 1047–1065. <https://doi.org/10.1007/s11422-019-09969-0>
- Septiadevana, R., & Abdullah, N. (2024). Designing a STEM project-based learning module for scientific literacy and critical thinking elementary school students. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 12(3), 662–682. <https://doi.org/10.24815/jpsi.v12i3.38255>
- Şimşek, F., & Hamzaoglu, E. (2023). The effect of context-based STEM activities on secondary school students' scientific literacy and STEM motivation. *Journal of Theoretical Educational Science*, 16(3), 574–595. <https://doi.org/10.30831/akukeg.1190159>
- Smith, T., Avraamidou, L., & Adams, J. D. (2022). Culturally relevant/responsive and sustaining pedagogies in science education: Theoretical perspectives and curriculum implications. *Cultural Studies of Science Education*, 17(3), 637–660. <https://doi.org/10.1007/s11422-021-10082-4>
- Sousa, M., Mendonça, J., & Fontão, E. (2023). The contextual environment as a catalyst for change in the learning process and learning styles of students. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, 18(21), 199–218. <https://doi.org/10.3991/ijet.v18i21.43415>
- Su, K. D. (2024). The challenge and opportunities of STEM learning efficacy for living technology through a transdisciplinary problem-based learning activity. *Journal of Science Education and Technology*, 33(4), 429–443. <https://doi.org/10.1007/s10956-024-10094-z>

- Sumarni, W., & Kadarwati, S. (2020). Ethno-STEM project-based learning: Its impact to critical and creative thinking skills. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 9(1), 11–21. <https://doi.org/10.15294/jpii.v9i1.21754>
- Wilson, K. (2021). Exploring the challenges and enablers of implementing a STEM project-based learning programme in a diverse junior secondary context. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 19(5), 881–897. <https://doi.org/10.1007/s10763-020-10103-8>
- Yoon, J., & Rosado, L. (2025). Summer Multicultural Institute for Linked Education (SMILE) in Korea: Enhancing educators' cultural competency and affinity. *Croatian Journal of Education*, 27(4), 1465–1503. <https://doi.org/10.15516/cje.v27i4.6449>

Li Wan

Wuhan Optics Valley No.10 Primary School
(Wuhan Primary School Optics Valley Branch)
No. 1, Xiong Zhuang Road, Hongshan District
430074 Wuhan, China
14590041@qq.com

Projektno učenje u STEM područjima temeljeno na socioznanstvenim temama: sinergijski razvoj vještina znanstvene argumentacije i međukulturalne znanstvene pismenosti

Sažetak

U ovome se istraživanju istražuje model projektnoga učenja (PBL) temeljen na socioznanstvenim temama kako bi se premostio jaz između znanstvene i humanističko-društvene pismenosti u obrazovanju u STEM područjima. Primjenom kvaziekperimentalnih nacrtâ istraživanja, dvanaest razreda u kojima se uče teme iz STEM područja podijeljeno je u eksperimentalnu (primjena projektnoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama) i kontrolnu (tradicionalni oblik nastave) skupinu. Rezultati pokazuju da je eksperimentalna skupina značajno unaprijedila vještine znanstvene argumentacije (ES = 1,32 za strukturirano izražavanje; ES = 0,87 za korištenje dokaza) i međukulturalnu znanstvenu pismenost (npr. +2,15 u multikulturalnim perspektivama, +1,83 u etičkoj osjetljivosti). Analiza diskursa pokazala je povećanje od 41 % u međukulturalnim referencama, s 82,6 % ispitanika koji su integrirali različita znanstvena gledišta. U istraživanju se predlaže Model kulturološki responzivne znanstvene argumentacije koja podrazumijeva uvođenje socioznanstvenih tema u STEM kurikule kako bi se razvijao znanstveni način razmišljanja, kulturološka inkluzivnost i globalna odgovornost.

Ključne riječi: *etička osjetljivost; globalna odgovornost; integracijske kompetencije; kulturološki responzivna pedagogija; kvaziekperimentalni nacrt istraživanja*

Uvod

Suvremeno obrazovanje u STEM područjima nastoji premostiti jaz između znanstvene racionalnosti i sociohumanističke pismenosti, pogotovo kada se radi o složenim socioznanstvenim temama poput klimatskih promjena i etičke primjene umjetne inteligencije (Septiadevana i Abdullah, 2024, str. 662). Dok se projektno učenje cijeni zbog toga što razvija interdisciplinarnе vještine (Sumarni i Kadarwati, 2020, str. 11), a socioznanstvene teme predstavljaju autentičan kontekst za etička

razmatranja, STEM kurikuli često daju prednost tehničkim vještinama, a manje etičkim i međukulturalnim perspektivama (Owens i Hite, 2022, str. 76).

Međutim, još uvijek postoje velike praznine u istraživanjima. Kao prvo, dok se projektno učenje i socioznanstvene teme istražuju odvojeno, njihova strukturna integracija u STEM kurikule na tercijarnoj razini obrazovanja ostaje neistražena, pogotovo u obrazovnim kontekstima koji se ne nalaze u zapadnom svijetu. Kao drugo, postojeći okviri ocjenjivanja često mjere znanstvenu argumentaciju i kulturološku kompetenciju izolirano, ne uzimajući u obzir njihovu potencijalnu sinergijsku povezanost. Kao treće, glavni modeli argumentacije često ne slijede načela postupnosti pri snalaženju u kulturološkim konfliktima koji su nezaobilazni u globalnim socioznanstvenim temama. Na kraju, međukulturalna znanstvena pismenost kao konstrukt često ne sadrži operativne definicije koje bi bile dovoljno jake za mjerenje u STEM kontekstu.

Ovim se istraživanjem pokušavaju premostiti navedene praznine tako što se ispituje kako projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama može razviti strukturiranu znanstvenu argumentaciju i međukulturalnu znanstvenu pismenost. U sklopu istraživanja razvijen je *Okvir kulturološki responzivne argumentacije* koji obuhvaća lokalne i globalne socioznanstvene teme. Primjenom kvaziekperimentalnih metoda i analize diskursa istraživanje pokazuje kako takav pristup potiče precizno razmišljanje i kulturološku inkluzivnost, pružajući transformacijski model za globalno obrazovanje u STEM područjima.

U ovome je istraživanju primijenjen kvaziekperimentalni nacrt kako bi se ispitalo može li model projektinoga učenja temeljen na socioznanstvenim temama učinkovito potaknuti sinergijski razvoj vještina znanstvene argumentacije i međukulturalnu znanstvenu pismenost među studentima dodiplomskih studija. Točnije, u istraživanju se nastoji odgovoriti na tri ključna pitanja: 1) U kojoj mjeri intervencija pomoću projektinoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama može bolje razviti vještine znanstvene argumentacije među studentima nego što to može tradicionalna nastava u STEM područjima?; 2) U kojoj mjeri ista intervencija istovremeno može povećati i razinu međukulturalne znanstvene pismenosti među studentima? i 3) Kakva je intrinzična veza između razvoja sposobnosti znanstvene argumentacije i međukulturalne znanstvene pismenosti?

Na temelju Okvira za kulturološki responzivnu znanstvenu argumentaciju i konstruktivističkih teorija učenja, očekujemo da će studenti u eksperimentalnoj skupini koji sudjeluju u projektinomu učenju temeljenom na socioznanstvenim temama pokazati značajno veći napredak i u strukturiranom izražavanju i u upotrebi dokaza u znanstvenoj argumentaciji u usporedbi sa svojim kolegama u kontrolnoj skupini. Isto tako, očekuje se da će eksperimentalna skupina pokazati poboljšanje u višestrukim dimenzijama međukulturalne znanstvene pismenosti, uključujući multikulturalne perspektive, etičku osjetljivost te kulturološku integraciju. Nadalje, naša je hipoteza da razvoj ovih dviju kompetencija nije neovisan, nego pokazuje značajnu pozitivnu korelaciju te tako upućuje na postojanje sinergijske veze u praksi. Na kraju, predviđamo da će razine

kulturoloških tenzija i kontroverzi koje su neizostavni dio zadataka projektnoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama izazvati pozitivan moderirajući učinak na razvoj argumentacijske dubine i sposobnosti kulturološke integracije.

Metodologija

Nacrt istraživanja

U ovome je istraživanju primijenjen mješoviti pristup s ciljem ispitivanja kako projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama potiče integrirani razvoj znanstvene argumentacije i međukulturalne pismenosti u obrazovanju u STEM područjima. U istraživanju je kombinirana kvazieksperimentalna studija koja je trajala 16 tjedana i koja je obuhvatila predtest i posttest s kontrolnom skupinom, s kasnijom kvalitativnom analizom interakcija u razredu i predmeta koji su se koristili u projektnome učenju. Time se učvrstila valjanost i praktična važnost rezultata.

Eksperimentalna skupina svaki je tjedan imala nastavni sat projektnoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama, koji je trajao 90 minuta. Obradeno je osam interdisciplinarnih nastavnih tema o suvremenim pitanjima kao što su klimatski inženjering i uređivanje gena, što se odlično nadovezalo na STEM pojmove sa socioznanstvenim dimenzijama i etičkim dilemama. Suprotno tome, kontrolna skupina sudjelovala je u konvencionalnoj nastavi tijekom koje je obrađen sličan nastavni sadržaj, no bez razgovora o kulturološkim ili etičkim dimenzijama. Model projektnoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama tijekom nastavne intervencije sustavno je integrirao znanstveno znanje s razmatranjima o kulturološkim vrijednostima i globalnoj odgovornosti. Model projektnoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama prikazan je na Slici 1.

Slika 1

Kako bi se razjasnile varijable u istraživanju i predviđene putanje, u ovome je istraživanju izrađen sljedeći model putanje temeljen na konstruktivističkoj teoriji učenja. Prema tome modelu, projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama privlači pozornost studenata na etičke i kulturološke dimenzije unutar znanstvenoga konteksta te tako unaprjeđuje njihovu strukturu argumentacije i dubinu kulturološke refleksije. Ovaj proces sinergijski unaprjeđuje njihove vještine znanstvene argumentacije i međukulturalnu znanstvenu pismenost.

Uzmimo da (1) T označava vrstu nastavne intervencije ($T = 1$ za skupinu koja je sudjelovala u projektnome učenju temeljenom na socioznanstvenim temama, $T = 0$ za skupinu koja je sudjelovala u tradicionalnoj nastavi); (2) A predstavlja razinu sposobnosti znanstvene argumentacije; (3) C označava razinu međukulturalne znanstvene pismenosti; a (4) P označava izvedbu projektnoga zadatka. Preliminarni model regresijske putanje prikazan je jednadžbom (1):

$$\begin{cases} A = \beta_0 + \beta_1 T + \varepsilon_1 \\ C = \gamma_0 + \gamma_1 T + \varepsilon_2 \\ P = \delta_0 + \delta_1 A + \delta_2 C + \varepsilon_3 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

pri čemu, i predstavljaju marginalni učinak nastavne intervencije na svaku varijablu, a označava pogrešku za koju se pretpostavlja da slijedi nezavisnu normalnu distribuciju. Ovaj model će se testirati pomoću modeliranja strukturnih jednadžbi u odjeljku Rezultati.

Kako bi se osigurala usklađenost i usporedivost intervencije, razredi su nasumično svrstani u eksperimentalnu i u kontrolnu skupinu, a broj studenata bio je jednako raspoređen u ove dvije skupine. Obje skupine poučavala je ista skupina kvalificiranih nastavnika kako bi se utjecaj nastavnika držao pod kontrolom. Time je osigurana dosljednost sadržaja, vremena nastave te metoda ocjenjivanja. Jedina razlika između dviju skupina bila je varijabla intervencije. Tablica 1 prikazuje usporedbu vrste nastave u eksperimentalnoj i u kontrolnoj skupini.

Tablica 1

Sudionici i svrstavanje u skupine

U istraživanju je sudjelovalo 480 studenata u dodiplomskim STEM studijskim programima na kineskom sveučilištu za znanost i inženjerstvo tijekom 2024./2025. akademske godine. Sudionici su studirali u različitim područjima (inženjerstvo, znanost, matematika), a njihovi su razredi bili nasumično svrstani u eksperimentalnu skupinu (koja je pratila nastavu prema modelu projektnoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama) ili u kontrolnu skupinu (koja je pratila tradicionalnu nastavu temeljenu na zadacima). U objema skupinama intervencija je trajala 16 tjedana.

Svi su sudionici dali svoj pristanak za sudjelovanje u istraživanju, dok je sveučilište dalo etičku suglasnost. Podatci o sudionicima prikupljeni su putem anonimne ankete kako bi se procijenili mogući moderirajući faktori, a demografski podatci prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2

Kako bi se osigurala znanstvena preciznost i uravnoteženi nastavni resursi, 12 skupina studenata iz 8 različitih područja studiranja nasumično je numerirano. Zatim su skupine jednako raspoređene u eksperimentalnu i u kontrolnu skupinu, sa 6 skupina ili 240 studenata u svakoj, pomoću računalno izrađenoga nasumičnog uvjeta (engl. *random seed*). Obje skupine poučavali su nastavnici koji su završili odgovarajuću edukaciju kako bi se kontrolirala varijabla nastavnika. Struktura intervencije prikazana je na Slici 2.

Slika 2

Za ispitivanje diferencijalnih učinaka intervencije putem varijable o sudionicima, u istraživanju su kontrolirana dva potencijalna moderirajuća faktora: poznavanje engleskoga jezika i prethodno iskustvo u STEM projektima. Distribucija sudionika prema glavnim predmetnim područjima i podjeli u skupine prikazana je na Slici 3.

Slika 3

Iz perspektive statističkoga modeliranja, probni testovi usklađenosti i kovarijatne kontrole bili su uključeni u analizu kako bi se ublažili potencijalno zbunjujući utjecaji varijabli o sudionicima. U daljnjim analizama, uključujući ANOVA analizu i modeliranje putanje, moderirajući učinci atributa sudionika na zavisne varijable izraženi su na sljedeći način: uzmimo da označava rezultat znanstvene argumentacije studenta i , njihovo svrstavanje u skupinu, status njihovoga iskustva u STEM projektima, a njihovu razinu znanja engleskoga jezika (pretvorenu u brojčanu skalu). Regresijski model s kontroliranim kovarijatima prikazan je u jednadžbi (2):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 T_i + \beta_2 E_i + \beta_3 L_i + \beta_4 T_i \cdot E_i + \beta_5 T_i \cdot L_i + \epsilon_i \dots\dots\dots (2)$$

pri čemu predstavlja glavni učinak nastavne intervencije, i su interakcijski članovi između intervencije i varijabli o sudionicima, korišteni za testiranje heterogenosti učinka nastave s obzirom na iskustvo u projektima i znanje engleskoga jezika.

Koncept nastavne intervencije

U sklopu ovoga istraživanja proveden je nastavni model koji je obuhvatio projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama. Model je integrirao znanstveno znanje, etičko promišljanje i kulturološku raznolikost kako bi se omogućio simultani razvoj znanstvene argumentacije i međukulturalne pismenosti (Badaruddin i sur., 2024, str. 597). Intervencija se sastojala od osam interdisciplinarnih projekata koji su se bavili ekološkim, tehnološkim i etičkim socioznanstvenim temama, a projekti su se provodili svaka dva tjedna.

Osmišljen prema kulturološki responzivnoj pedagogiji i konstruktivističkoj teoriji, u pristupu je korišten Model kulturološki responzivne znanstvene argumentacije (CRSA) (Brown i Crippen, 2016, str. 470). U njemu se naglašava etičko-kulturološka osjetljivost tijekom znanstvenoga istraživanja te se studente vodi k stvaranju argumenata temeljenih na dokazima, dok istovremeno promišljaju i o globalnoj odgovornosti.

Kružni proces Modela kulturološki responzivne znanstvene argumentacije (Slika 4) počinje s kulturološki konfliktnim scenarijima kako bi se potaknula uključenost studenata. Sljedeća faza je stvaranje argumenata temeljenih na dokazima te ponavljanje putem interakcije unutar skupine. Zadnja je faza reflektivna integracija znanja i perspektiva za društveno odgovorna rješenja.

Slika 4

Eksperimentalna skupina pratila je model projektinoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama pomoću standardiziranih nastavnih priručnika kako bi se nastava provodila dosljedno, dok je kontrolna skupina sudjelovala u tradicionalnoj, predavačkoj nastavi, koja je trajala jednako dugo i u kojoj su se obrađivale iste teme, no nije obuhvaćala kulturološke konflikte i procese argumentacije. Ključne razlike u konceptu nastave i načinima učenja između dviju skupina sustavno su uspoređene i prikazane u Tablici 3.

Tablica 3

Svaka projektna cjelina sastojala se od četiriju temeljnih zadataka učenja: (1) analize tema kako bi se studentima pomoglo prepoznati tenzije koje postoje između znanosti i društva; (2) izrada dokaza kako bi se uvježbao način prikupljanja i evaluacije podataka i kulturoloških materijala; (3) suradnja pri argumentaciji koja je zahtijevala dijalektičke aktivnosti unutar skupina i između skupina i (4) integracija prijedloga putem koje su studenti izrađivali kulturološki respozivne znanstvene prijedloge. Uz ovaj koncept, nastavnom se intervencijom pokušala postići integracija znanstvene racionalnosti i kulturološkoga razumijevanja.

Mjerni instrumenti i izvori podataka

U ovome smo se istraživanju fokusirali na dvije temeljne varijable kompetencija – sposobnost znanstvene argumentacije i međukulturalnu znanstvenu pismenost da bismo detaljno procijenili utjecaj nastavne intervencije koja obuhvaća projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama. Također su proučene i višestruke moderirajuće i kontrolne varijable. Izrađen je strukturirani i diversificirani sustav mjernih instrumenata. Sve skale prošle su kroz pregled literature, prijevod, recenzije te proces stručne procjene kako bi se osigurala valjanost sadržaja. Pokusnim istraživanjem (N = 98) testirana je strukturna pouzdanost, čime su potvrđena zadovoljavajuća psihometrijska svojstva pogodna za empirijsko istraživanje (Wilson, 2021, str. 881). Proces prikupljanja podataka strogo je slijedio protokole etičke provjere, a provodio ga je tim istraživača.

Temeljne mjerne varijable obuhvatile su sposobnost znanstvene argumentacije, međukulturalnu znanstvenu pismenost, motivaciju za učenje, percipiranu složenost zadatka te opće poznavanje engleskoga jezika. U Tablici 4 prikazana je struktura i osnovna statistika za sve mjerne instrumente.

Kako bi se provjerila valjanost konstrukata mjernih instrumenata, provedena je konfirmatorna faktorska analiza (CFA) na dvije osnovne skale: Skali međukulturalne znanstvene pismenosti i Podskali prilagođene motivacije. Model konfirmatorne faktorske analize za Skalu međukulturalne znanstvene pismenosti pokazao je odgovarajuće indekse prikladnosti: $\chi^2/df = 2,87$, CFI = 0,94, TLI = 0,92, RMSEA = 0,06, SRMR = 0,04. Sva faktorska opterećenja za mjerene tvrdnje i njihove pripadajuće latentne konstrukte (Multikulturološka perspektiva, Etička osjetljivost, Kulturološka integracija) bila su značajna ($p < ,001$). Vrijednost im je varirala od 0,65 do 0,88, čime je potvrđena hipoteza o trofaktorskoj strukturi. Slično tome, motivacijska je skala također pokazala dobru prikladnost jednofaktorskoga modela ($\chi^2/df = 2,15$, CFI = 0,97, TLI = 0,96, RMSEA = 0,05, SRMR = 0,03), s faktorskim opterećenjima između 0,71 i 0,89. Ti rezultati potvrđuju valjanost konstrukata temeljnih mjernih alata korištenih u ovome istraživanju.

Tablica 4

Analiza podataka

Za provjeru učinka nastavne intervencije primijenjena je mješovita analiza varijance (ANOVA) tipa 2 (skupina: eksperimentalna - kontrolna) x 2 (vrijeme: predtest –

posttest). Ova je analiza provedena na dvjema primarnim zavisnim varijablama: rezultatu postignutom na znanstvenoj argumentaciji i rezultatu postignutom na međukulturalnoj znanstvenoj pismenosti. Ova analiza eksplicitno testira učinak interakcije skupina x vrijeme, što je neophodno kako bi se odredila razlika u promjenama tijekom vremena između eksperimentalne i kontrolne skupine. Pretpostavka o homogenosti varijanci provjerena je pomoću Levenova testa. U slučajevima u kojima je ova pretpostavka narušena, za određivanje stupnjeva slobode primijenjena je nešto konzervativnija Greenhouse-Geisserova korekcija, a zabilježene su i prilagođene p-vrijednosti. Uz to, s ciljem ispitivanja faktora koji predviđaju postojanje sposobnosti međukulturalne integracije (binarni ishod), provedena je binarna logistička regresija. Korelacijska analiza i modeliranje putanje (jednadžbe 1 i 2) također su provedeni kako bi se ispitale veze i mehanizmi među varijablama.

Rezultati

Sinergijski razvoj znanstvene argumentacije i međukulturalne pismenosti

Slika 5 pokazuje usporedbu sposobnosti znanstvene argumentacije između eksperimentalne i kontrolne skupine. Rezultati pokazuju da je eksperimentalna skupina imala značajno bolji rezultat od kontrolne skupine u svim dimenzijama znanstvene argumentacije ($p < 0,001$). Najveća je razlika uočena u dimenziji strukturiranoga izražavanja/ekspresije, pri čemu je rezultat eksperimentalne skupine bio $4,32 \pm 0,58$, dok je kontrolna skupina ostvarila rezultat od $2,89 \pm 0,67$ te je tako postignuta velika veličina učinka ($ES = 1,32$). Kvaliteta korištenja dokaza također je pokazala znatnu prednost eksperimentalne skupine, sa srednjom razlikom od $+3,21$ i veličinom učinka od $0,87$. Ovaj superiorni rezultat može se pripisati sustavnom osmišljavanju kurikula projektne nastave temeljene na socioznanstvenim temama. Na primjer, u nastavnim cjelinama u kojima se obrađuje uređivanje gena i klimatska pravda, učenici su sudjelovali u nastavi koja se odvija prema Modelu kulturološki responzivne znanstvene argumentacije. Od njih se tražilo da integriraju znanstvene dokaze i znanje o ekologiji u različitim kulturama. Jedan je takav primjer narod Dai, koji štuje vodena božanstva, što je predstavljalo kulturološki aspekt za bolje razumijevanje ekoloških vrijednosti. Ovakva je integracija značajno unaprijedila koherentnost njihovoga strukturiranja argumenata te kvalitetu prezentiranih dokaza. Za razliku od njih, kontrolna skupina, koja nije prošla edukaciju o integraciji multikulturoloških dokaza, prvenstveno je prezentirala argumente s jednostavnoga znanstvenog gledišta, što je polučilo rezultate strukturalne ekspresije u vrijednosti manjoj od tri na skali s vrijednostima do 5.

Slika 5

Slika 6 prikazuje analizu razvoja međukulturalne znanstvene pismenosti. Rezultati pokazuju da je u dvije ključne dimenzije eksperimentalna skupina ostvarila znatno bolji rezultat nego kontrolna skupina. U dimenziji *Međukulturalna perspektiva donošenja*

odluka u znanosti eksperimentalna skupina ostvarila je rezultat od $18,95 \pm 2,63$, u usporedbi s kontrolnom skupinom čiji je rezultat iznosio $16,80 \pm 3,17$ ($F = 49,82$, $p < 0,001$). U dimenziji *Znanstvena etička osjetljivost*, rezultati su imali vrijednosti $19,83 \pm 2,56$ i $18,00 \pm 2,78$, za svaku skupinu pojedinačno ($F = 58,16$, $p < 0,001$). Ovo poboljšanje direktno je povezano s izradom kurikula koji je obuhvatio etičke dileme poput balansiranja zapadnjačkoga utilitarizma i afričkoga plemenskog kolektivizma u nastavnoj cjelini o raspodjeli cjepiva. Također je uključio i tenzije između tehnološke neutralnosti i ravnopravnosti spolova u nastavnoj cjelini o predrasudama o umjetnoj inteligenciji. Ovi kulturološki konteksti puni tenzija doveli su do povećanja od 3,08 bodova u etičkoj osjetljivosti kod eksperimentalne skupine, u usporedbi s povećanjem od samo 1,25 bodova kod kontrolne skupine.

Slika 6

Provedena je mješovita ANOVA tipa 2×2 s ciljem utvrđivanja učinka nastavne intervencije koja je uključila projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama. Kod kompozitnoga rezultata za znanstvenu argumentaciju, Leveneov test pokazao je homogenost varijanci ($p = 0,124$). Analiza je pokazala značajan glavni učinak Vremena, $F(1, 478) = 210,35$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,31$, značajan glavni učinak skupine, $F(1, 478) = 95,62$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,17$ te, što je osobito bitno, značajnu interakciju skupina \times vrijeme, $F(1, 478) = 167,43$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,26$. Ova značajna interakcija potvrđuje da je poboljšanje od predtesta do posttesta bilo značajno veće u eksperimentalnoj nego u kontrolnoj skupini. Slični su rezultati utvrđeni i za međukulturalnu znanstvenu pismenost (Leveneov $p = 0,089$; interakcija skupina \times vrijeme: $F(1, 478) = 142,18$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,23$). Detaljan prikaz rezultata ANOVA analize može se vidjeti u Tablici 5.

Tablica 5

Tablica 6 prikazuje korelacijsku matricu između sposobnosti argumentacije i međukulturalne pismenosti. Matrica otkriva jake korelacije između kvalitete upotrebe dokaza i multikulturalnoga donošenja odluka ($r = 0,68$, $p < 0,001$), kao i između strukturiranoga izražavanja i sposobnosti kulturološke integracije ($r = 0,71$, $p < 0,001$). Vrijednosti prosječne ekstrahirane varijance (AVE) na dijagonali (0,79 – 0,88) prelaze korelacije izvan dijagonale, što potvrđuje diskriminantnu valjanost skala. Najjača korelacija utvrđena je između sposobnosti kulturološke integracije i prezentacije inovativnosti ($r = 0,82$). To govori da studenti pokazuju veću kreativnost kada u svoje STEM projekte integriraju različite kulturološke perspektive – poput kolektivizma tipičnoga za konfucijanizam i autohtonih ekoloških stavova. Ova sinergija odražava integrirani dizajn kulture, znanosti i etike u kurikul projektanoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama.

Tablica 6

Bihevioristički dokazi iz međukulturalne argumentacijske prakse

Slika 7 pokazuje analizu međukulturalnih referenci u razrednom diskursu. Ključni pokazatelji otkrivaju da je u eksperimentalnoj skupini frekvencija međukulturalnih referenci porasla s $3,82 \pm 1,27$ na $5,39 \pm 1,43$ puta tijekom svakoga nastavnog procesa, što je povećanje od 41,1 % ($\chi^2 = 112,6$, $p < 0,001$). Valja napomenuti da je kod kulturološki konfliktnih scenarija stopa citiranja zabilježila veliki porast s 28,3 % na 67,5 %. To je povećanje rezultat kurikula koji je osmišljen tako da izaziva konfliktne situacije. Na primjer, u nastavnoj cjelini o iskopavanjima morskoga tla, u simulaciji suđenja namjerno su suprotstavljena uvjerenja stanovnika pacifičkih otoka da je ocean nasljeđe njihovih predaka i ekonomski podatci kompanija koje provode iskopavanja u morskom tlu, potičući tako studente da u svoje argumente uključe multikulturalne perspektive. Frekvencija promjena etičkoga stava također se značajno povećala (s 0,62 na 2,87), što pokazuje učinkovitost kurikula temeljenoga na socioznanstvenim temama u rušenju fiksnih kulturoloških uvjerenja, dok je taj brojčani podatak kod kontrolne skupine iznosio samo 0,71.

Slika 7

Slika 8 pokazuje distribuciju sposobnosti međukulturalne integracije. U eksperimentalnoj skupini, 52,9 % studenata ostvarilo je potpunu integraciju (≥ 3 kulturalne perspektive), a 29,6 % ostvarilo je djelomičnu integraciju (2 perspektive), što iznosi ukupno 82,5 %. Za razliku od toga, samo je 7,5 % kontrolne skupine ostvarilo potpunu integraciju. Indeks integracije značajno se razlikovao između skupina ($2,33 \pm 0,58$ nasuprot $1,02 \pm 0,87$, $t = 20,81$, $d = 1,78$), što se može pripisati izradi kurikula temeljenoga na socioznanstvenim temama u kojemu je integracija obvezna. Na primjer, u nastavnoj cjelini o digitalnoj transformaciji od studenata se tražilo da sintetiziraju znanje o nomadskom stočarstvu, izazovima koje stvaraju digitalni imigranti te podatcima tehnoloških kompanija kako bi izradili rješenja koja se mogu prilagoditi različitim kulturama. Od studenata koji nisu prošli eksperimentalni oblik nastave, 39,6 % nije pokazalo sposobnost integracije.

Slika 8

Učinkovitost i mehanizmi projektnih rezultata

Na Slici 9 prikazane su evaluacije projektnih rezultata. Od svih dimenzija, kulturološka integracija pokazala je najznačajniju razliku među skupinama (eksperimentalna: $85,42 \pm 5,16$, a kontrolna: $70,83 \pm 7,12$, $t = 27,35$, $p < 0,001$). Visoki rezultati u tehničkoj provedbi ($87,35 \pm 5,27$) i originalnosti ($88,17 \pm 4,38$) upućuju na to da kulturološka integracija ne sprječava razvoj temeljnih STEM kompetencija. Upravo suprotno, ona potiče inovacije ($ES = 2,98$). Reprezentativni slučajevi obuhvaćaju biotehnoški projekt koji je provela eksperimentalna skupina, a koji je integrirao znanstvene podatke o genetski modificiranoj hrani, prehrambenim ograničenjima koja nalaže muslimanska vjera te istočnoazijsku tradiciju homologije medicine i hrane kako bi se osmislila rješenja koja se mogu prilagoditi raznim kulturama. Za razliku od njih, rješenja kontrolne skupine

bila su ograničena na tehničke parametre. Ova razlika proizlazi iz činjenice da je u modelu projektnoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama integracija bila obavezni element te su tako u svaki projekt morale biti uključene barem tri različite kulturološke perspektive.

Slika 9

Logistička regresijska analiza sposobnosti međukulturalne integracije prikazana je u Tablici 7. Model pokazuje da je sudjelovanje u nastavnoj intervenciji koja je uključila projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama bilo najjači prediktor integracijske kompetencije ($OR = 16,18, p < 0,001$). Kada se radi o eksperimentalnoj skupini, izgledi su bili 16,2 puta veći da će studenti pokazati takve sposobnosti nego studenti u kontrolnoj skupini. Značajni učinci su također uočeni u poznavanju engleskoga jezika ($OR = 1,86$) i izloženosti kulturološkoj različitosti ($OR = 2,79$), što upućuje na to da jezične vještine i međukulturalna iskustva služe kao nezamjenjivi faktori koji takve sposobnosti omogućavaju. Na primjer, u projektu o vodenim resursima koji se protežu preko velikih površina studenti koji su tečnije govorili engleski jezik i koji su bili boravili u međunarodnom okružju mogli su bolje razumjeti pojmove znanstvenoga upravljanja u različitim državama. Model je prošao Hosmer-Lemeshow test prikladnosti modela ($p = 0,612$) te pokazao pouzdanu prediktivnu vrijednost ponašanja koje pokazuje međukulturalnu integraciju.

Tablica 7

Moderirajući utjecaj *kulturološke tenzije* na razvoj vještina prikazan je u Tablici 8. Moderacijski model pokazuje da je kulturološka tenzija značajno predvidjela dubinu znanstvene argumentacije ($\beta = 0,43$), dok je etička kontroverza bila snažan prediktor međukulturalne integracije ($\beta = 0,51$). Njihov učinak interakcije također je bio značajan ($\beta = 0,29$). U nastavnim cjelinama u kojima je indeks kulturološke tenzije bio visok ($\geq 0,85$), poput klimatske pravde i upravljanja vodom, dubina argumentacije koju su studenti pokazali povećala se za 32 %. Kada se uz to doda i visoka etička kontroverza (indeks $\geq 9,0$), razina integracije povećana je za 41 %. Na primjer, u nastavnoj cjelini o smanjenju emisije ugljičnih plinova studenti su istraživali sukob između globalnoga razvoja Sjevera i Juga (tenzija = 0,92). Također su se uključili u debate o povijesnoj odgovornosti (etički indeks = 9,8). Te su rasprave potaknule studente na razvijanje modela diferencirane odgovornosti. Modeli su imali za cilj dovesti u ravnotežu afričke razvojne potrebe i imperativne klimatske znanosti.

Tablica 8

Diskusija

Ovo istraživanje pruža čvrste dokaze da model projektnoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama učinkovito potiče sinergijski razvoj znanstvene argumentacije i međukulturalne znanstvene pismenosti. Naši rezultati proširuju postojeće teorijske okvire i nude praktične implikacije za obrazovanje u STEM područjima.

Interpretacija ključnih rezultata s obzirom na teorijske okvire

Značajni napredak u strukturiranoj argumentaciji ($ES = 1,32$) i korištenju dokaza ($ES = 0,87$) u eksperimentalnoj skupini (Slika 5) uvelike ide u prilog Modelu kulturološki responzivne znanstvene argumentacije koju su predložili Brown i Crippen (2016). Za razliku od tradicionalnoga projektnog učenja koje je uglavnom fokusirano na tehničko rješavanje problema, naš Model kulturološki responzivne znanstvene argumentacije koji obuhvaća projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama eksplicitno koristi kulturološke i etičke tenzije kao kognitivne katalizatore. Na primjer, povećanje od 41 % u međukulturalnim referencama (Slika 7) i visoka stopa integracije različitih perspektiva (82,5 %, Slika 8) pokazuju da je model uspješno uključio kulturološki responzivnu pedagogiju (Smith i sur., 2022, str. 637) tako što je apstraktnu kulturološku raznolikost transformirao u konkretne argumentacijske resurse. Tako se popunjava praznina u istraživanjima o kojoj se pisalo u uvodnom dijelu, a koja se odnosi na okvire koji zanemaruju kulturološku vrijednost konflikata.

Sinergija između argumentacije i međukulturalne pismenosti

Snažne korelacije između kvalitete dokaza i međukulturalnoga donošenja odluka ($r = 0,68$) i između strukturiranoga izražavanja i kulturološke integracije ($r = 0,71$) (Tablica 5) nisu puki statistički rezultati. Oni empirijski potvrđuju očekivanu razvojnu putanju integracije. Sinergija upućuje na to da znanstveni način razmišljanja i kulturološka kompetencija jedno drugo osnažuju i da ne predstavljaju suprotne ciljeve. Rezultat logističke regresije ($OR = 16,18$, Tablica 6) jasno pokazuje da je sama nastavna intervencija koja obuhvaća projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama glavni pokretač razvoja sposobnosti međukulturalne integracije, čak i u većoj mjeri nego neki pozadinski faktori poput znanja engleskoga jezika. To je direktan odgovor na naše istraživačko pitanje o tome kako projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama može istovremeno razvijati obje kompetencije.

Pokretačka uloga kulturološke tenzije i etičke dileme

Moderacijska analiza (Tablica 7) pruža mehanicističko objašnjenje. Rezultat koji pokazuje da je kulturološka tenzija značajno predvidjela dubinu argumentacije ($\beta = 0,43$) i da je njezina interakcija s etičkom kontroverzom predvidjela integraciju ($\beta = 0,29$) kvantitativno podržava pedagoški princip korištenja konflikta kao pokretača procesa učenja. To ujedno proširuje Acutovu (2024) teoriju imerzivnoga učenja jer kvantitativno određuje kako specifične kontekstualne karakteristike (tenzija, kontroverza) aktiviraju dublju i socioemocionalnu uključenost, što vodi k uočenim rezultatima u inovativnim projektima ($ES = 2,98$, Slika 9).

Ograničenja i teorijske implikacije

Iako su rezultati našega istraživanja obećavajući, ono ipak ima ograničenja. Uzorak koji se sastoji od studenata s jednoga sveučilišta ograničava generalizaciju rezultata. Nadalje, istraživanje je trajalo 16 tjedana pa stoga ne može pokazati dugoročnost

rezultata, iako je pokazalo značajan učinak. No, bez obzira na ta ograničenja, naš rad nadilazi dualno kodiranje o kojemu govore Mir i sur. (2023) jer naglašava integraciju, a ne suprotstavljena gledišta. Također razvija i postkritičku teoriju (Rezende i Ostermann, 2020) jer pruža empirijski model, testiran u nastavi. Buduća bi istraživanja trebala ispitivati razvojne putanje ove sinergije u skupinama ispitanika različite životne dobi. Nadalje, uspješna provedba kulturološki responzivne pedagogije u različitim obrazovnim kontekstima, posebno u kontekstu osnovnoškolskoga i srednjoškolskoga obrazovanja, od nastavnika zahtijeva visoku razinu kulturološke kompetencije. Programi profesionalnoga usavršavanja koji su izrađeni s ciljem razvoja međukulturalnih vještina obrazovnih djelatnika, poput Ljetnoga multikulturalnog instituta za povezano obrazovanje (engl. SMILE) (Yoon i Rosado, 2025) su stoga od velike važnosti za učinkovito mjerenje modela projektnoga učenja temeljenoga na socioznanstvenim temama.

Zaključak

Ovo istraživanje pokazuje da projektno učenje temeljeno na socioznanstvenim temama učinkovito integrira znanstvenu racionalnost i humanističko-socijalnu pismenost. Stvaranjem okružja za učenje koje uključuje kulturološke tenzije i etičke dileme, model omogućava istovremeni razvoj znanstvene argumentacije i međukulturalne kompetencije. Kulturološki responzivan pristup omogućava učenicima kritičku uključenost u složene socioznanstvene teme, istovremeno poštujući razlike u kulturološkim vrijednostima i stvarajući globalno odgovorne talente u području STEM-a.

Tri ograničenja zahtijevaju posebnu pažnju: 1) fokusiranost na sveučilišne studente ograničava generalizaciju rezultata na osnovnoškolski i srednjoškolski kontekst, pogotovo s obzirom na razvojne razlike u etičkom promišljanju, 2) intervencija koja je trajala 16 tjedana onemogućila je dugoročno praćenje razvoja međukulturalne pismenosti i 3) alati za procjenu neadekvatno opisuju nezapadnjačke epistemologije, dok digitalne platforme mogu imati tehnološke predrasude.

Smjernice za buduća istraživanja uključuju: 1) izradu STEM kurikula temeljenih na socioznanstvenim temama za učenike u dobi od 16 godina, a koji će sadržavati modele napretka u razvoju, 2) korištenje umjetne inteligencije kako bi se u stvarnom vremenu analizirali obrasci međukulturalne argumentacije, 3) izradu globalnoga repozitorija sa slučajevima u kojima su se koristile socioznanstvene teme, posebno iz regija Belt i Road te 4) uključivanje međukulturalne pismenosti u nacionalne STEM standarde primjenom trodimenzionalnih (znanost – kultura – etika) okvira procjene.

Napomena

Za pripremu ovoga rukopisa nije dobiveno nikakvo financiranje. Neobrađene rezultate koji idu u prilog zaključcima prezentiranima u ovome radu autori će učiniti dostupnima na zahtjev. Autori ne navode postojanje sukoba interesa.

Svi sudionici u ovome istraživanju dali su svoju suglasnost za sudjelovanje.