



Muslima Q. SALOHIDDINOVA,
ToshDO'TAU Kompyuter lingvistikasi mutaxassisligi magistranti
E-mail:salohiddinovamuslimakhon267@gmail.com, ORCID: 0009-0004-08864361

Filologiya fanlari doktori(DSc) Sh.Hamroyeva taqrizi asosida

THE LINGUISTIC NATURE OF THE CONCEPTS OF IRONY AND SARCASM

Annotation

This article analyzes the linguistic nature of irony and sarcasm based on contemporary scientific literature. The study aims to identify the semantic, pragmatic, discursive, and multimodal features of irony and sarcasm, as well as to explain their similarities and differences. Drawing on recent studies, the paper examines the manifestation of irony and sarcasm in written discourse, social media communication, the use of emojis, children's comprehension of speech, as well as their interpretation in computational linguistics and artificial intelligence-based detection systems.

Key words: Irony, sarcasm, pragmatics, discourse, multimodality, emojis, sentiment analysis, computational linguistics.

ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПОНЯТИЙ ИРОНИИ И САРКАЗМА

Аннотация

В данной статье на основе современных научных источников анализируется лингвистическая природа иронии и сарказма. Цель исследования заключается в выявлении семантических, прагматических, дискурсивных и мультимодальных особенностей иронии и сарказма, а также в объяснении их сходств и различий. В работе на основе последних исследований рассматривается проявление иронии и сарказма в письменной речи, социальных сетях, использовании эмодзи, восприятии речи детьми, а также их интерпретация в компьютерной лингвистике и системах автоматического распознавания на основе искусственного интеллекта.

Ключевые слова: Ирония, сарказм, прагматика, дискурс, мультимодальность, эмодзи, анализ тональности, компьютерная лингвистика.

KINOYA (IRONIYA) VA SARKAZM (ISTEHZO) TUSHUNCHALARINING LINGVISTIK TABIATI

Annotatsiya

Mazkur maqolada kinoya (ironiya) va sarkazm (istehzo) tushunchalarining lingvistik tabiati zamonaviy ilmiy adabiyotlar asosida tahlil qilingan. Kinoya va sarkazmning semantik, pragmatik, diskursiv hamda multimodal xususiyatlarini aniqlash, ularning o'zaro o'xshash va farqli jihatlarini izohlashdan iborat. Maqolada so'nggi yillarda chop etilgan tadqiqotlardan foydalanib, kinoya va sarkazmning yozma nutq, ijtimoiy tarmoqlar, emoji, bolalar nutqini qabul qilishi, shuningdek, kompyuter lingvistikasi va sun'iy intellekt asosida aniqlash tizimlaridagi talqini ko'rib chiqilgan.

Kalit so'zlar: Kinoya(ironiya), sarkazm(istehzo), pragmatika, diskurs, multimodal, emoji, sentiment tahlili, kompyuter lingvistikasi.

Kirish. Til inson tafakkuri, hissiyoti va ijtimoiy munosabatlarini ifodalovchi murakkab vositadir. Nutqda ma'no har doim ham bevosita emas, balki ba'zan bilvosita, yashirin yoki teskari shaklda ifodalanadi. Shu jihatdan kinoya va sarkazm alohida ahamiyatga ega. Ular nafaqat badiiy nutqda, balki kundalik muloqot, ommaviy axborot vositalari, ijtimoiy tarmoqlar va raqamli muloqotda ham keng qo'llanadi.

Kinoya va sarkazm ko'pincha bir-biriga yaqin tushuncha sifatida talqin qilinsa-da, ilmiy adabiyotlarda ularning farqli jihatlari ko'rsatib o'tiladi. Sarkazm odatda kinoyaning keskinroq, salbiyroq va masxaraviy shakli sifatida baholanadi. Zamonaviy tadqiqotlarda bu hodisalar semantik qarama-qarshilik, yashirin maqsad, emotsional rang va matn bilan bog'liq holda o'rganilmoqda.

Tadqiqot metodologiyasi. Mazkur tadqiqot metodologik jihatdan sifat tahliliga asoslangan ilmiy-nazariy

1-jadval. Tahlil qilingan tadqiqotlarning asosiy yo'nalishlari

Tadqiqot yo'nalishi	Mazmuni	Ilmiy ahamiyati
Ironiyani o'qish jarayonida anglash	Yozma matn qabul qilish va mantiqiy xulosa chiqarish orqali anglash	Ironiyaning kognitiv-pragmatik tabiatini ochib beradi
Emoji va ironik ma'no	Emoji yordamida ironiyani anglash va eslab qolish	Multimodal pragmatikaning rolini ko'rsatadi

sharh sifatida olib borildi. Tadqiqot materiali sifatida foydalanuvchi tomonidan taqdim etilgan hamda so'nggi yillarda nashr qilingan ilmiy maqolalar tanlandi. Ushbu manbalar kinoya va sarkazmning turli lingvistik ko'rinishlarini, jumladan, kinoyani anglash, emoji va kompyuter vositasidagi muloqotda kesatq ma'no, multimodal kinoya, sarkazmni aniqlash va sun'iy intellektga asoslangan modellarni qamrab oladi. Tadqiqotda deskriptiv-tahliliy, qiyosiy, diskursiv-pragmatik va interpretativ umumlashtirish metodlaridan foydalanildi. Shu asosda kinoya va sarkazmning semantik, pragmatik hamda diskursiv xususiyatlari tahlil qilinib, ularning o'xshash va farqli jihatlari, shuningdek, matn, muloqot vaziyati va multimodal vositalarning ma'no shakllanishidagi o'rni yoritildi.

Multimodal ironiya	Matn, tasvir va platforma formatining birikishi	Zamonaviy kommunikatsiyada ironiyaning yangi shakllarini tushuntiradi
Sarkazmni avtomatik aniqlash	NLP va sun'iy intellekt asosidagi modellar	Sarkazmni algoritmlar yordamida aniqlashning o'ziga xos qiyinchiliklarini ko'rsatadi.
Sarkazm korpuslari	Standart ma'lumotlar to'plami va annotatsiya	Empirik tadqiqotlar uchun metodologik baza yaratadi
Kontekstual kollokatsiyalar	Sarkazmning kontekst va so'zlararo munosabat asosida aniqlanishi	Diskursiv va semantik tahlilning ahamiyatini oshiradi

Ushbu jadvalda mazkur tadqiqot doirasida tahlil qilingan ilmiy ishlarning asosiy yo'nalishlari umumlashtirildi. Jadvalda ironiyani anglash, emoji'lar va multimodal vositalarning roli, sarkazmni avtomatik aniqlash, korpus yaratish va kontekstual yondashuv kabi yo'nalishlarning mazmuni hamda ilmiy ahamiyati ko'rsatildi. Ushbu jadval tahlil qilingan manbalarning mavzuni yoritishdagi mavzuiy qamrovini tizimli ravishda aks ettiradi.

Tahlil va natijalar. Tahlil qilingan manbalar kinoya va sarkazmni lug'aviy ma'no bilan ko'zlangan ma'no o'rtasidagi nomuvofiqlik asosida yuzaga keladigan murakkab lingvistik hodisalar sifatida talqin qiladi [1], [6]. Ushbu yondashuvga ko'ra, ironik va sarkastik ifodalarda til yuzasida ifodalangan mazmun bilan nutq egasi ko'zlangan asl kommunikativ maqsad o'rtasida ziddiyat mavjud bo'ladi. Kinoyada bu ziddiyat

2-jadval. Kinoya va sarkazmning asosiy lingvistik belgilar

Belgilar	Kinoya	Sarkazm
Ma'no tuzilishi	Lug'aviy va yashirin ma'no o'rtasidagi bilvosita nomuvofiqlik	Lug'aviy va yashirin ma'no o'rtasidagi keskin nomuvofiqlik
Emotsional yo'nalish	Neytral, yumshoq tanqidiy yoki hazilomuz bo'lishi mumkin	Asosan salbiy, keskin, tanqidiy
Pragmatik maqsad	Bilvosita baholash, nozik munosabat bildirish	Mazax, istehzo, kuchli tanqid, ranjiti
Adresatga ta'sir	Interpretatsiya va inferensiyani talab qiladi	Tezroq seziladi, affektiv kuchi yuqori
Ekspressivlik darajasi	Nisbatan past yoki o'rta	Nisbatan yuqori
Kontekstga bog'liqlik	Juda yuqori	Juda yuqori
Multimodal vositalar bilan bog'liqligi	Emoji, tasvir va kontekst bilan kuchayadi	Emoji, tasvir va salbiy signal bilan kuchayadi

Tahlillar kinoya va sarkazmning o'zaro yaqin hodisalar ekanini ko'rsatsa-da, ularning emotsional yo'nalishi, pragmatik vazifasi, adresatga ta'siri va ekspressiv darajasi bir xil emasligini ham ko'rsatadi [2], [7]. Kinoya ko'p hollarda bevosita tajovuzkor tusga ega bo'lmaydi. U nozik tanqid, yashirin baholash, yumshoq kulgi yoki ijtimoiy-estetik masofa shaklida yuzaga chiqishi mumkin [8]. Sarkazm esa, odatda, salbiy emotsional fon bilan bog'liq bo'lib, unda tanqidiylik, istehzo, mazax yoki keskin munosabat kuchliroq ifodalanadi [1]. Pragmatik jihatdan kinoyada so'zlovchi o'z munosabatini bilvosita ma'no orqali yetkazadi va adresatdan mazkur yashirin ma'noni tiklash uchun chuqur tahlil talab etiladi [4]. Sarkazm esa muloqot maqsadi nisbatan aniqroq, keskinroq va ko'pincha muayyan obyektga yoki shaxsga qaratilgan bo'ladi [5]. Adresatga ta'sir nuqtayi nazaridan kinoya ko'proq intellektual va kontekstual ma'noni anglashni talab qiladi, chunki uning ma'nosi ko'pincha bevosita yuzada emas, balki yashirin qatlamda joylashadi [2]. Sarkazm esa salbiy baholashning yuqori darajasi tufayli tezroq seziladi va kuchliroq hissiy ta'sir uyg'otishi mumkin [9]. Shu sababli ayrim tadqiqotlarda sarkazm kinoyaning keskinlashgan, o'tkir yoki ekspressiv jihatdan kuchaygan shakli sifatida tavsiflanadi [7].

Ko'rib chiqilgan barcha manbalarda kinoya va sarkazmni anglashda matn hal qiluvchi omil sifatida qayd etiladi [2], [4]. Xususan, yozma va raqamli kommunikatsiyada intonatsiya, mimika, yuz ifodasi, ovoz ohangi va pauza kabi og'zaki nutqqa xos ko'rsatkichlarning mavjud emasligi sababli, matnning o'zi ko'pincha yetarli bo'lmaydi. Shuning uchun kinoyali yoki istehzoli(sarkastik) ma'noni aniqlash uchun oldingi diskurs, muloqot vaziyati, ijtimoiy munosabatlar, madaniy bilim, vizual ishoralar, emoji va grafik vositalar kabi qo'shimcha pragmatik omillar muhim rol o'ynaydi [4], [6]. Tadqiqotlardan birida ironiyani o'qish jarayonida qabul qilish oddiy leksik-semantik dekodlash emas, balki xulosa chiqarish va kognitiv qayta ishlash jarayoni ekanligi ko'rsatildi [2]. Bu natija ironiyaning lingvistik

ko'proq bilvosita, yashirin va kontekst orqali anglashiladigan shaklda namoyan bo'ladi [4]. So'zlovchi tashqi jihatdan ijobiy, neytral yoki oddiy ko'rindigan ifodadan foydalanishi mumkin, biroq vaziyat, nutqiy faoliyat va oldingi diskurs ushbu ifodaning teskari ma'noda qo'llanganini anglatadi. Masalan, no'rin vaziyatga nisbatan ijobiy shakldagi gapning qo'llanishi lug'aviy mazmun bilan pragmatik maqsad o'rtasidagi tafavutni yuzaga chiqaradi. Sarkazmda ham ana shu ikki qatlamli ma'no tuzilmasi mavjud bo'lsa-da, unda salbiy baholash, tanqid, mazax, istehzo yoki kamsitish komponenti ancha kuchliroq bo'ladi [7]. Natijada har ikki hodisaning lingvistik markazida yuzaki ma'no va yashirin implikativ ma'no o'rtasidagi munosabat turadi. Aynan shu ikki qavatli semantik-pragmatik tuzilma kinoya va sarkazmni oddiy to'g'ridan to'g'ri baholovchi ifodalardan ajratib turadi [8].

2-jadval. Kinoya va sarkazmning asosiy lingvistik belgilar

tabiati pragmatik va kognitiv omillar markaziy o'rin egallashini tasdiqlaydi. Shunga ko'ra, kinoya va sarkazmni faqat matn ichidagi strukturasi aniqlash ko'pincha yetarli bo'lmaydi, chunki ularning haqiqiy ma'nosi aynan matn bilan birgalikda shakllanadi [6]. Demak, ushbu hodisalarni tahlil qilishda nutqiy vaziyat, ishtirokchilar o'rtasidagi munosabat va diskurs albatta inobatga olinishi lozim.

Tahlil qilingan manbalar emoji'lar va multimodal vositalar kinoya hamda sarkazmni hosil qilish va anglashda muhim o'rin tutishini ko'rsatadi [4]. Kompyuter vositasidagi muloqotda emoji ko'pincha ironik signal vazifasini bajarib, matnning yashirin bahosini aniqlashga yordam beradi [6]. Shu bilan birga, multimodal tadqiqotlar kinoya va sarkazm faqat matn orqali emas, balki tasvir, grafik element, platforma formati va boshqa vizual belgilar bilan birgalikda yuzaga kelishini tasdiqlaydi [8]. Bu esa ularni zamonaviy kommunikatsiyada multimodal semiozis doirasida o'rganish zarurligini ko'rsatadi.

Taqdim etilgan manbalarning katta qismi sarkazmni avtomatik aniqlash muammosiga bag'ishlangan bo'lib, bu hodisa sentiment tahlilidagi eng murakkab obyektlardan biri ekanini ko'rsatadi [9]. Buning sababi istehzoli ifodalar ko'pincha yuzaki ijobiy yoki neytral ko'rinishda bo'lib, aslida salbiy bahoni ifodalashidir. Shuning uchun sarkazmni aniqlashda oddiy leksik birliklar yetarli bo'lmaydi; bunda matn, semantik ziddiyat, emotsional signal, kollokatsiya va ba'zan emoji ham muhim rol o'ynaydi [5], [6], [9]. Chuqur o'rganish, BILSTM, CNN va boshqa modellari aynan shu murakkablikni hisobga olishga qaratilgan [9].

Tahlil natijalari sarkazmni o'rganishda korpus va annotatsiya masalasi ham alohida ahamiyatga ega ekanini ko'rsatadi [3], [5], [9]. Chunki kinoya va sarkazm subyektiv talqiniga moyil hodisalar bo'lsa, ularni belgilashda izchil annotatsiya mezonlari, matnning saqlanishi va emotsional yo'nalishni to'g'ri qayd etish muhimdir [3]. Ayrim tadqiqotlar multimodal komponentlarni ham korpus tarkibiga kiritish

zarurligini ta'kidlaydi [8]. Olingan natijalar kinoya va sarkazmni oddiy stilistik vosita emas, balki semantika, pragmatika, diskurs tahlili va kompyuter lingvistikasi kesishgan nuqtada joylashgan murakkab kommunikativ hodisalar sifatida talqin qilish zarurligini ko'rsatadi.

Birinchi navbatda, kinoya va sarkazmning asosiy mohiyati lug'aviy ma'no bilan ko'zlangan ma'no o'rtasidagi tafovut bilan belgilanadi [1], [6]. Biroq tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, ushbu tafovutning o'zi mustaqil holda yetarli izoh bera olmaydi. Agar nutqning yuzaga kelish sharoiti, diskursning oldingi qismi, ijtimoiy vaziyat, so'zlovchi va tinglovchi o'rtasidagi munosabat, shuningdek, umumiy madaniy bilim inobatga olinmasa, ironik yoki sarkastik ma'noni to'g'ri talqin qilish qiyinlashadi [2], [8]. Demak, bu hodisalarning lingvistik tabiati strukturaviydan ko'ra ko'proq pragmatik xarakterga ega. Ular til tizimining ichki qoidalariga tayanishi bilan birga, ma'no hosil bo'lishida vaziyat va kontekstni hal qiluvchi omil sifatida yuzaga chiqaradi. Ayniqsa, yozma va raqamli kommunikatsiyada ma'no ko'pincha so'zlarning lug'aviy mazmunidan emas, balki ularning ishlatilish muhiti va qabul qilinish shartlaridan kelib chiqib belgilanadi [4]. Shu sababli kinoya va sarkazmni tahlil qilishda pragmatik yondashuv markaziy o'rin egallaydi. Ikkinchidan, tadqiqotlarda sarkazmni ko'pincha kinoyaning o'tkir va keskinroq yoki kuchaygan ko'rinishi sifatida ko'rsatsa-da, ushbu ikki hodisani to'liq birlashtirib yuborish ilmiy jihatdan asoslanmagan [9]. Natijalar shuni ko'rsatdiki, kinoya har doim ham tajovuzkor yoki salbiy bahoga asoslanmaydi. U ba'zan hazil, yumshoq, nozik tanqid, estetik masofa yoki bilvosita munosabat ifodalash shaklida namoyon bo'lishi mumkin [8]. Sarkazm esa aksariyat hollarda salbiy baholashning yuqori darajasi, masxara, istehzo, ranjitish yoki keskin tanqid bilan bog'lanadi [1]. Lingvistikada sarkazmni kinoyaning xususiy, ya'ni kuchli emosional-pragmatik yo'nalishga ega turi sifatida ko'rish maqsadga muvofiqdir. Bunda umumiylik ularning ikkalasida ham yashirin ma'no va semantik-pragmatik nomuvofiqlik mavjudligida namoyon bo'lsa, farq baholashning kuchaytirilishi, kommunikativ maqsad va adresatga ko'rsatadigan ta'sir kuchida namoyon bo'ladi [5]. Demak, kinoya va sarkazm o'rtasidagi munosabatni jins-tur tamoyili asosida izohlash mumkin, biroq ularning har birini alohida funksional-pragmatik hodisa sifatida saqlab qolish zarur.

Uchinchidan, zamonaviy kommunikatsiya muhitida kinoya va sarkazmning tabiati sezilarli darajada kengayganini kuzatish mumkin [8]. Ular endilikda faqat og'zaki yoki yozma nutq orqali emas, balki emoji, gif, rasm, video fragment, post formati, kommentlar zanjiri va muayyan platformaga xos muloqot madaniyati orqali ham shakllanadi [4], [8]. Bu holat ironiya va sarkazmni tushunishda multimodal pragmatik yondashuvning ahamiyatini kuchaytiradi. Chunki zamonaviy raqamli muhitda ma'no ko'pincha bir nechta semiotik kanalning o'zaro ta'siri

natijasida reallashadi. Masalan, bir xil matn emoji bilan qo'llanganda ironik tus olishi, emojilarsiz esa neytral yoki oddiy baho sifatida qabul qilinishi mumkin [6]. Xuddi shuningdek, rasm va matnning birgalikdagi qo'llanishi yoki postning joylashuvi ham ironik yoki sarkastik mazmunning yuzaga kelishida hal qiluvchi rol o'ynaydi [8]. Kinoya va sarkazmning hozirgi davrdagi lingvistik tabiatini anglash uchun faqat verbal tahlil yetarli emas. Multimodal vositalar, platforma xususiyatlari va raqamli diskursning ichki qoidalari ham tahlilning ajralmas qismi hisoblanadi.

To'rtinchidan, kompyuter lingvistikasidagi tadqiqotlar kinoya va sarkazmning nazariy murakkabligini amaliy darajada ham tasdiqlaydi [1], [3], [5]. Agar sarkazm oddiy salbiy leksika orqali ifodalanganida, uni avtomatik aniqlash masalasi nisbatan oson bo'lar edi. Biroq amaliy kuzatishlar shuni ko'rsatadiki, sarkazm ko'pincha ijobiy yoki neytral shaklda ifodalangan salbiy mazmunga ega bo'ladi [1], [7]. Shu bois sun'iy intellekt tizimlari uchun sarkazmni aniqlash sentiment tahlilidagi eng murakkab masalalardan biri bo'lib qolmoqda [1], [5], [9]. Modellar faqat so'zlarning yuzaki ma'nosiga emas, balki matn, kollokatsion bog'lanishlar, semantik qarama-qarshilik, emosional signal va ayrim hollarda emoji yoki boshqa multimodal elementlarga ham tayanishga majbur bo'lmoqda [5], [6]. Bu holat sarkazmning lingvistik jihatdan murakkab, ko'p qatlamli va diskursga bog'liq birlik ekanini yana bir bor tasdiqlaydi. Shuningdek, hisoblash modellarning muvaffaqiyati annotatsiya sifati, korpusning to'liqligi va matnning qamrab olish darajasiga bevosita bog'liq kuzatiladi [3], [9]. Demak, kompyuter lingvistikasidagi tadqiqotlar nazariy lingvistik xulosalarni amaliy jihatdan mustahkamlab, kinoya va sarkazmni o'rganishda integrativ yondashuv zarurligini ko'rsatadi. Demak, kinoya va sarkazmni o'rganishda integrativ yondashuv zarurligi ayon bo'ladi. Bunday yondashuv semantik, pragmatik va diskursiv tahlil bilan birga madaniyatlararo hamda multimodal yondashuvlarni, shuningdek, korpus va statistik metodlarni ham qamrab olishi lozim [3]. Chunki aynan shunday kompleks yondashuv kinoya va sarkazmning lingvistik tabiatini yanada to'liqroq yoritish imkonini beradi.

Xulosa. Mazkur tadqiqot natijalari kinoya va sarkazmning oddiy uslubiy vosita emas, balki murakkab semantik-pragmatik hodisalar ekanini ko'rsatdi. Ularning asosida lug'aviy ma'no bilan ko'zlangan ma'no o'rtasidagi nomuvofiqlik yotsa-da, haqiqiy mazmun faqat kontekst, nutqiy vaziyat va madaniy bilim asosida anglashiladi. Shu bilan birga, sarkazm salbiy baholash, tanqidiylik va mazaxning kuchliligi bilan kinoyadan farqlanadi, kinoya esa ko'proq yumshoq va bilvosita ifoda sifatida namoyon bo'ladi. Zamonaviy kommunikatsiyada bu hodisalar matn bilan birga emoji, tasvir va boshqa vizual vositalar orqali ham ifodalanayotgani ularni multimodal va integrativ yondashuv asosida o'rganish zarurligini ko'rsatadi.

ADABIYOTLAR

1. AL-anazi, R.G., Alzaidi, M.S.A., Elthahir, M.M., Almukadi, W.S., Alajmani, S.H., Darem, A.A., et al. An intelligent framework for sarcasm detection in Arabic tweets using deep learning with Al-Biruni earth radius optimization algorithm. *Alexandria Engineering Journal*, 2025. –P. 562-572.
2. Baric, T., Kyriaki, L., Forndran, A., Williamson, P., and Arciuli, J. Children's processing of irony during reading in English: An eye-tracking study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2025.
3. Biswas, S., Zahid, M.M.R., Rabeya, M.T., Abedin, M.M., Bijoy, M.H.I., and Rahman, M.S. BanglaSarc3: A benchmark dataset for Bangla sarcasm detection from social media to advance Bangla NLP. *Data in Brief*, 2025.
4. Du, Y., Yuan, Y., Wang, C., Zou, B., He, H., and Jia, K. Was this person being ironic? The role of emojis in irony comprehension and memory in computer-mediated communication: insights from the UK and China. *Telematics and Informatics*, 2026.
5. O., A. T., Arif, Sánchez-Mejorada, C. G., et al. From Word Pairs to Context: Interpretable Sarcasm Detection via Contextual Collocation Augmentation (C2A). *Procedia Computer Science*, 2026. –P. 447-454.
6. AlKindi, M. A., and Ouled Abdallah, N. Machine Learning-Based Irony Detection and Sentiment Analysis in Arabic Tweets with Emojis. *Procedia Computer Science*, 2026. –P. 3658-3667.
7. Prakash, O. Sarcasm Detection for Sentiment Analysis using Deep Learning Enhancement. *Procedia Computer Science*, 2025. –P. 203-210.
8. Sha, Y., and Brookes, G. Multimodal irony in public responses to digitally mediated NHS COVID-19 messaging. *Discourse, Context and Media*, 2026.
9. Subaita, W. Bin, Asiri, M. M., Alzaidi, M. S. A., Alanazi, M. H., Alshammeri, M., Yafoz, A., et al. Artificial Intelligence-based Natural Language Processing for sarcasm detection and classification on Arabic Corpus. *Alexandria Engineering Journal*, 2025. –P.320-331.