ANJIR MEVALARINI QURITISH JARAYONINI TIZIMLI TAHLIL QILISH VA SAMARALI BOSHQARISH TEXNOLOGIYASI

Muzafarova Manzura
Buxoro davlat texnika universiteti
https://doi.org/10.5281/zenodo.23230403

Annotatsiya. Ushbu maqolada anjir (Ficus carica L.) mevalarini quritish jarayonini tizimli tahlil qilish va samarali boshqarishning ilmiy-texnologik asoslari yoritilgan. Quritish jarayoni issiqlik va massa almashinuvi, namlik migratsiyasi, mahsulot strukturasi, qurituvchi havo parametrlari hamda yakuniy mahsulot sifatining o‘zaro bog‘langan tizimi sifatida ko‘rib chiqiladi. Anjirni issiq havo bilan quritish bo‘yicha tadqiqotlarda jarayonning asosiy qismi pasayuvchi quritish tezligi davrida kechishi, oldindan ishlov berish esa quritish vaqtini qisqartirishi mumkinligi aniqlangan. Shu bilan birga, yuqori shakar miqdori va po‘stloqning namlikka qarshiligi yuzaki qotish hamda notekis qurish xavfini oshirishi mumkin.

Maqolada quritish jarayonining tizimli modeli, texnologik parametrlarni monitoring qilish, namlik nisbati va quritish tezligini aniqlash, samarali diffuziya koeffitsientini hisoblash, matematik kinetik modellarni tanlash, energiya sarfini baholash va mahsulot sifatini monitoring qilish usullari taklif etiladi. Bundan tashqari, sensorlar, sun’iy intellekt, kompyuter ko‘rishi va adaptiv boshqaruvni birlashtiruvchi intellektual quritish tizimining konseptual modeli ishlab chiqilgan. Zamonaviy tadqiqotlar AI va sensor texnologiyalarini integratsiyalash oziq-ovqat quritish jarayonlarini real vaqt rejimida monitoring qilish, bashoratlash va optimallashtirish imkonini berishini ko‘rsatmoqda.

Kalit so‘zlar: anjir, Ficus carica L., quritish, tizimli tahlil, issiqlik almashinuvi, massa almashinuvi, namlik migratsiyasi, quritish kinetikasi, samarali boshqaruv, sensor, sun’iy intellekt, adaptiv boshqaruv, energiya samaradorligi.

Abstract. This article presents the scientific and technological foundations for systematic analysis and efficient control of fig (Ficus carica L.) drying. The drying process is considered as an interconnected system involving heat and mass transfer, moisture migration, product structure, drying-air parameters, energy consumption, and final product quality. Previous studies on hot-air drying of figs have shown that drying is predominantly characterized by a falling-rate period, while pretreatment can substantially shorten drying time. High sugar content and resistance of the peel to moisture transfer may also increase the risk of case hardening and non-uniform drying.

A systematic framework is proposed based on drying kinetics, moisture-ratio analysis, effective moisture diffusivity, mathematical modeling, energy assessment, quality monitoring, sensor technologies, artificial intelligence, computer vision, and adaptive control. Recent research indicates that integration of AI and sensor technologies can enable real-time monitoring, prediction and optimization of food drying processes. The proposed framework provides a basis for transforming conventional fixed-parameter drying into an adaptive and data-driven drying technology.

Keywords: fig, Ficus carica L., drying, systematic analysis, heat transfer, mass transfer, moisture migration, drying kinetics, efficient control, sensors, artificial intelligence, adaptive control, energy efficiency.

Аннотация. В статье изложены научно-технические основы системного анализа и эффективного управления процессом сушки инжира (Ficus carica L.). Процесс сушки рассматривается как взаимосвязанная система, включающая тепло- и массообмен, миграцию влаги, структуру продукта, параметры сушильного агента и качество готового продукта. Исследования сушки инжира горячим воздухом показывают, что основная часть процесса протекает в период падающей скорости сушки, а предварительная обработка позволяет сократить время процесса. Однако высокое содержание сахара и сопротивление кожицы перемещению влаги могут повысить риск затвердевания поверхности и неравномерности сушки.

В статье предложены методы разработки системной модели процесса сушки, мониторинга технологических параметров, определения влагосодержания и скорости сушки, расчета коэффициентов эффективной диффузии, выбора математических моделей кинетики, оценки энергозатрат и контроля качества продукта. Кроме того, разработана концептуальная модель интеллектуальной системы сушки, объединяющая датчики, искусственный интеллект, компьютерное зрение и адаптивное управление. Современные исследования демонстрируют, что интеграция технологий искусственного интеллекта и сенсорных систем позволяет осуществлять мониторинг, прогнозирование и оптимизацию процессов сушки пищевых продуктов в режиме реального времени.

Ключевые слова: инжир, Ficus carica L., сушка, системный анализ, теплообмен, массообмен, миграция влаги, кинетика сушки, эффективное управление, датчик, искусственный интеллект, адаптивное управление, энергоэффективность.

Kirish. Anjir (Ficus carica L.) oziqaviy va biologik qiymati yuqori bo‘lgan mevalardan biri bo‘lib, yangi holatda saqlash muddati cheklanganligi sababli uni quritish muhim qayta ishlash texnologiyalaridan hisoblanadi. Quritilgan anjir uzoq muddat saqlanishi, tashish qulayligi va konsentrlangan oziqaviy tarkibi bilan yangi mahsulotga nisbatan iqtisodiy jihatdan ham ahamiyatlidir.

An’anaviy quyoshda quritish oddiy va nisbatan kam energiya talab qiluvchi usul bo‘lsa-da, jarayonning ob-havo sharoitlariga bog‘liqligi, mikrobiologik xavflar va quritish rejimining nazorat qilinmasligi mahsulot sifatining o‘zgaruvchan bo‘lishiga olib kelishi mumkin. Mexanik issiq havo bilan quritish esa harorat, nisbiy namlik va havo oqimini boshqarish imkonini beradi. Anjir bo‘yicha tadqiqotlarda mexanik quritish jarayon parametrlarini aniq boshqarish va sanitariya sharoitlarini yaxshilash imkonini berishi ko‘rsatilgan.

Biroq quritish jarayonini faqat harorat va vaqtni belgilash orqali boshqarish yetarli emas. Mahsulotning boshlang‘ich namligi, o‘lchami, po‘stlog‘i, qand miqdori va ichki strukturasidagi farqlar quritish kinetikasini o‘zgartiradi.

Shuning uchun zamonaviy quritish texnologiyasida jarayonni “xomashyo–quritish muhiti–namlik almashinuvi–energiya–mahsulot sifati–boshqaruv” yagona tizimi sifatida ko‘rib chiqish zarur. Anjirning o‘ziga xos xususiyati shundaki, uning po‘stlog‘i namlikning

tashqariga chiqishiga qarshilik ko‘rsatishi mumkin. Yuqori shakar miqdori esa yuzaki qatlamning qotishi xavfini kuchaytiradi. Piga va hammualliflar anjirni issiq havo bilan quritishda aynan shu muammolar sababli dastlabki bosqichlarda yumshoqroq harorat va nisbatan namroq havo ishlatish foydali bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatgan.

Harorat oshishi:

- suv molekulalarining kinetik energiyasini oshiradi;
- bug‘ bosimi farqini kuchaytiradi;
- namlik diffuziyasini tezlashtiradi;
- quritish vaqtini qisqartiradi.

Ammo haddan tashqari yuqori harorat:

- rangning qorayishi;
- qandlarning termik o‘zgarishi;
- biologik faol moddalar yo‘qolishi;
- teksturaning buzilishi

kabi oqibatlarni kuchaytirishi mumkin.

Shu sababli optimal harorat “eng yuqori” emas, balki sifat va samaradorlikning muvozanat nuqtasi bo‘lishi kerak.

Havo tezligi oshishi mahsulot yuzasidagi chegara qatlamini yupqalashtirib, tashqi massa almashinuvini kuchaytiradi. Biroq ichki diffuziya cheklovchi bosqichga aylangandan so‘ng havo tezligini yanada oshirishning samarasi kamayadi. Anjir bo‘yicha tajribalar ham quritishning keyingi bosqichlarida ichki massa uzatish qarshiligining muhimligini ko‘rsatadi.

Nisbiy namlik qancha past bo‘lsa, mahsulot yuzasi bilan havo o‘rtasidagi namlik potensiali farqi shuncha katta bo‘lishi mumkin. Ammo jarayonning boshlang‘ich bosqichida haddan tashqari quruq havo anjir yuzasining juda tez qurishiga va keyinchalik ichki namlik migratsiyasining cheklanishiga olib kelishi mumkin.

Anjir uchun samarali boshqaruv tizimida quritish parametrlarini butun jarayon davomida o‘zgarmas holda saqlash o‘rniga bosqichli boshqaruvdan foydalanish mumkin.

I bosqich — moslashtirish

- nisbatan yumshoq harorat;
- o‘rtacha nisbiy namlik;
- nazoratli havo oqimi.

Maqsad — mahsulot yuzasining haddan tashqari tez qurishini oldini olish.

II bosqich — faol quritish

- issiqlik uzatishni kuchaytirish;
- havo namligini kamaytirish;
- namlik migratsiyasini tezlashtirish.

III bosqich — yakuniy quritish

- mahsulot namligini aniq kuzatish;
- haroratni haddan tashqari oshirmaslik;
- sifat parametrlarini nazorat qilish.

Bu konsepsiya anjir uchun olib borilgan tajribalardagi yumshoq boshlang‘ich sharoit va keyinchalik havoning nisbiy namligini kamaytirish yondashuviga mos keladi.

Anjirni quritishdan oldingi ishlov berish namlik almashinuvi va mahsulot sifatiga sezilarli ta’sir qilishi mumkin.

Mumkin bo‘lgan variantlar:

1. nazorat — ishlovsiz;
2. blanshirlash;
3. boshqa fizik oldindan ishlov;
4. texnologik jihatdan ruxsat etilgan kimyoviy ishlov.

Piga va hammualliflar tadqiqotida blanshirlash hamda blanshirlash+sulfurlash ishlovlari quritish vaqtini nazoratga nisbatan qisqartirgan. O‘sha tajriba sharoitida ishlovsiz anjirlar taxminan 54 soatda, blanshirlashdan o‘tganlar 37 soatda, kombinatsiyalangan ishlovdagi mevalar 33 soatda belgilangan namlikka yetgan. Bu natijalar aynan o‘sha tajriba sharoitiga tegishli bo‘lib, universal texnologik norma sifatida qo‘llanmasligi kerak.

Samarali boshqaruv uchun quritgich quyidagi sensorlar bilan jihozlanishi mumkin:

Datchik	O‘lchanadigan parametr	Vazifasi
Termopara	Havo harorati	Issiqlik rejimini nazorat qilish
RH sensori	Nisbiy namlik	Quritish potensialini baholash
Anemometr	Havo tezligi	Massa almashinuvini boshqarish
Elektron tarozi	Massa	Namlik kamayishini aniqlash
IR sensor	Mahsulot yuzasi harorati	Mahsulot holatini kuzatish
Kamera	Rang va shakl	Sifat monitoringi
Energiya sensori	Energiya sarfi	Samaradorlikni baholash

Anjir bo‘yicha tadqiqotlarda bir qator yupqa qatlamli modellar sinovdan o‘tkazilib, ayrim tajriba sharoitlarida ikki hadli eksponensial model yuqori moslashuv ko‘rsatgani aniqlangan. Biroq boshqa nav va sharoitlarda boshqa modellar ustun bo‘lishi mumkin.

Mahalliy anjir navlari uchun eksperimental tadqiqot quyidagi omillar asosida tashkil qilinishi mumkin:

Omil	Tavsiya etiladigan darajalar
Harorat	55, 65, 75, 85 °C
Havo tezligi	0,5; 1,0; 2,0; 3,0 m/s
RH	tajriba quritgichi imkoniyatiga ko‘ra
Oldindan ishlov	nazorat / blanshirlash
Namuna	bir xil massa va o‘lchamdagi mevalar
Takroriylik	kamida 3 takror
Yakuniy mezon	belgilangan namlik va/yoki aw

Tadqiqot muhokamasi. Anjirni quritish jarayonini tizimli tahlil qilish shuni ko‘rsatadiki, jarayonning samaradorligini faqat bitta parametr orqali boshqarish mumkin emas. Haroratni oshirish quritish vaqtini qisqartirishi mumkin, ammo bu mahsulot sifatiga salbiy ta’sir ko‘rsatishi ehtimoli mavjud. Havo tezligini oshirish esa dastlab foydali bo‘lsa-da, ichki diffuziya cheklovchi bosqichga aylangach, qo‘shimcha samarasi kamayadi.

Anjir bo‘yicha tajribalar yumshoq issiq havo sharoitida ham jarayonning asosiy qismi pasayuvchi tezlik davrida kechishini ko‘rsatgan. Oldindan ishlov berish quritish vaqtini qisqartirishi mumkin, biroq ishlov turi mahsulotning rang, oziqaviy va xavfsizlik ko‘rsatkichlari bilan birgalikda baholanishi kerak.

Zamonaviy texnologik yondashuvda ushbu jarayonni uch bosqichli intellektual tizimga ajratish maqsadga muvofiq:

Monitoring → Prognozlash → Boshqarish.

Monitoring sensorlar orqali ma’lumot beradi. Prognozlash AI modeli orqali kelajakdagi mahsulot holatini aniqlaydi. Boshqarish moduli esa jarayon parametrlarini optimal holatga keltiradi. Biroq bunday tizimni amaliyotga joriy etishda ma’lumotlar yetishmasligi, sensorlarning yuqori harorat va namlik sharoitida barqarorligi, AI modelining boshqa nav va quritgichlarga ko‘chirilishi, hisoblash xarajatlari va “qora quti” muammosi mavjud. 2026-yilgi sharhda aynan model umumlashuvi, sensor shovqini, hisoblash murakkabligi va interpretatsiya qilinuvchanligi asosiy muammolar qatorida qayd etilgan.

Shu sababli anjir uchun eng maqbul istiqbolli yo‘nalish sof “qora quti” AI emas, balki fizik qonuniyatlar + tajriba ma’lumotlari + AI kombinatsiyasiga asoslangan gibrid modeldir.

Taklif etilayotgan yondashuvning ilmiy yangiligi quyidagi yo‘nalishlarda ifodalanishi mumkin:

1. anjir quritish jarayonini issiqlik almashinuvi, massa almashinuvi, sifat va energiya ko‘rsatkichlarini birlashtirgan tizim sifatida tavsiflash;
2. quritish kinetikasini real vaqt ma’lumotlari asosida baholash;
3. samarali diffuziya koeffitsientini texnologik boshqaruv parametri sifatida qo‘llash;
4. sensor va kompyuter ko‘rish ma’lumotlarini yagona monitoring tizimiga birlashtirish;
5. AI yordamida quritishning qolgan vaqtini prognozlash;
6. ko‘p mezonli optimallashtirish orqali vaqt–energiya–sifat muvozanatini aniqlash;
7. quritish parametrlarini mahsulot holatiga qarab avtomatik o‘zgartiruvchi yopiq konturli boshqaruv tizimini ishlab chiqish;
8. fizik model va ma’lumotlarga asoslangan AI modelini gibridlashtirish.

Biroq iqtisodiy samaradorlikni tasdiqlash uchun real quritgichda energiya sarfi, mahsulot yo‘qotilishi, ishlab chiqarish unumdorligi va kapital xarajatlar bo‘yicha alohida tajriba o‘tkazish zarur. Anjir mevalarini quritish jarayonini samarali boshqarish uchun uni faqat harorat va vaqtga bog‘liq oddiy texnologik operatsiya sifatida emas, balki issiqlik almashinuvi, massa almashinuvi, namlik migratsiyasi, mahsulot sifati, energiya sarfi va boshqaruv qarorlari o‘zaro bog‘langan murakkab tizim sifatida ko‘rib chiqish zarur.

Anjirning yuqori namligi, qandlarga boyligi va po‘stlog‘ining namlik migratsiyasiga qarshiligi quritish jarayonini murakkablashtiradi. Adabiyotlarda anjir quritishining asosiy qismi pasayuvchi tezlik davrida kechishi, oldindan ishlov berish esa quritish vaqtini qisqartirishi mumkinligi ko‘rsatilgan.

Bunday tizimda quritish jarayoni oldindan belgilangan qat’iy rejim bo‘yicha emas, balki anjirning real holati va sensor ma’lumotlariga asoslangan holda boshqariladi. Zamonaviy tadqiqotlar AI va sensorlar yordamida oziq-ovqat quritish jarayonlarini real vaqt rejimida monitoring qilish, bashoratlash va optimallashtirish mumkinligini tasdiqlamoqda.

Shu sababli anjir uchun “aqlli quritish” texnologiyasini yaratish nafaqat quritish vaqtini va energiya sarfini kamaytirish, balki mahsulot sifatining barqarorligini oshirish, ishlab chiqarishni avtomatlashtirish va raqamli oziq-ovqat texnologiyalariga o‘tish uchun muhim ilmiy-amaliy yo‘nalish hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Piga, A., Pinna, I., Özer, K. B., Agabbio, M., & Aksoy, U. (2004). Hot air dehydration of figs (Ficus carica L.): drying kinetics and quality loss. International Journal of Food Science & Technology, 39(7), 793–801.
2. Zhong, Y., Zhang, M., Feng, M., Semenov, G., & Yu, D. (2025). Artificial intelligence-based multi-objective optimization in fruit and vegetable drying systems: A comprehensive review. Food Research International, 218, 116873.
3. Wang, Z., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Lin, J., & Yu, D. (2025). AI technology in smart drying of foods: A critical review of research and applications. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 103, 104052.
4. Guo, J., Zhang, X., Liu, Y., Wu, J., Xu, H., Xiao, H., Ai, Z., & Gong, P. (2026). Intelligent monitoring, predicting, and control technology of food drying: Recent advances, challenges, and future prospects. Food Control, 180, 111666.
5. Review on the recent trends of food dryer technologies and optimization methods of drying parameters. (2025). Applied Food Research, 5(1), 100927.
6. A framework for closed-loop intelligent control in food drying: A review and perspective. (2026). Food Control.
7. Artificial intelligence techniques for microwave drying of agricultural products: A comprehensive review on modeling, intelligent control, and process optimization. (2026). Applied Food Research.
8. Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion. Oxford University Press.
9. Mujumdar, A. S. (Ed.). Handbook of Industrial Drying. CRC Press.
10. Babalis, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., & Belessiotis, V. G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (Ficus carica). Journal of Food Engineering, 75(2), 205–214.