SAFETY-BY-DESIGN IN ENGINEERING LOGISTICS: A CONCEPTUAL MODEL FOR PRELIMINARY RISK ASSESSMENT IN WAREHOUSE AND PRODUCTION-LOGISTICS SYSTEMS*

YORDANKA I. YANKOVA-YORDANOVA, NIKOLAY H. YORDANOV

ABSTRACT: *The paper adapts Prevention through Design to engineering logistics by treating safety as a design criterion in warehouse and production-logistics systems. A conceptual five-stage SbD-L (Safety-by-Design for Logistics) model is proposed for project definition, preliminary risk screening, safe design, implementation control and operational feedback. The study uses systems and comparative analysis of standards, European regulatory sources and peer-reviewed PtD literature. Preliminary screening combines severity and likelihood, while exposure, avoidability and adequacy of controls are treated as contextual factors. SbD-L is a diagnostic framework, not a substitute for legally required risk assessment, and requires subsequent expert and empirical validation.*

KEYWORDS: *Safety-by-Design, Prevention through Design, engineering logistics, occupational safety, risk management, warehouse systems, design*

DOI: https://doi.org/10.46687/MT26YIY

SAFETY-BY-DESIGN В ИНЖЕНЕРНАТА ЛОГИСТИКА: КОНЦЕПТУАЛЕН МОДЕЛ ЗА ПРЕДВАРИТЕЛНА ОЦЕНКА НА РИСКА ПРИ СКЛАДОВИ И ПРОИЗВОДСТВЕНО-ЛОГИСТИЧНИ СИСТЕМИ

ЙОРДАНКА И. ЯНКОВА-ЙОРДАНОВА, НИКОЛАЙ Х. ЙОРДАНОВ

АБСТРАКТ: *Публикацията адаптира логиката Prevention through Design към инженерната логистика, като разглежда безопасността като проектен критерий при складови и производствено-логистични системи. Предложен е пететапен концептуален модел SbD-L (Safety-by-Design for Logistics), обхващащ проектно задание, предварителен скрининг на риска, безопасно проектиране, контрол при внедряване и обратна връзка от експлоатацията. Скринингът съчетава тежест и вероятност, а излагането, възможността за избягване и контролните мерки се използват като контекстуални фактори. Моделът не замества нормативно изискуемата оценка на риска и подлежи на последващо експертно и емпирично апробиране.*

1 Въведение

В инженерната логистика решенията за пространство, потоци и оборудване се вземат преди системата да започне реална експлоатация. Именно в този ранен етап се задават редица предпоставки за бъдещата безопасност: широчина и пресичане на маршрути, видимост, места за маневриране, височина и достъп до складирани товари, зони за зареждане, взаимодействие между пешеходци и индустриални превозни средства, начин на поддръжка и възможности за аварийна реакция. Ако тези въпроси останат извън проектното решение, последващите мерки често се свеждат до маркировка, инструкции, обучение или

* Докладът е частично финансиран по проект РД-08-94/03.02.2026 г. „Експериментална и изследователска среда за моделиране, анализ и оптимизация на производствени процеси и технологии“

лични предпазни средства, които не винаги могат да компенсират неблагоприятно проектирана среда. Логиката Prevention through Design (PtD) изхожда от идеята опасностите да се елиминират или ограничават възможно най-рано в жизнения цикъл на работното място, процеса, оборудването или технологията [1], [2]. Значителна част от научната литература по PtD е развита в строителството, където редица изследвания свързват проектните решения с последващи рискове за безопасността [3]–[5]. Тази доказателствена база не може автоматично да бъде пренасяна към складовите системи, но подкрепя по-общия принцип, че решенията „нагоре по веригата“ на проектирането могат да създават или ограничават опасности още преди началото на експлоатацията.

В настоящата публикация терминът Safety-by-Design се използва като работно обозначение за адаптиране на тази логика към инженерно-логистични системи. Целта не е да се въвежда нов нормативен термин, а да се структурира подход, при който безопасността участва в самото инженерно решение редом с капацитета, производителността, разходите и качеството на логистичния процес.

Целта на изследването е да се предложи концептуален модел SbD-L (Safety-by-Design for Logistics) за предварително интегриране на безопасността при проектиране и промяна на складови и производствено-логистични системи. Обект на изследването са складовите и производствено-логистичните системи, а предмет - връзката между проектните решения, предварителното разпознаване на опасностите и избора на мерки за намаляване на риска. Работната теза е, че ранното включване на критериите за безопасност в проектното задание и в избора между технически варианти създава по-добра основа за превенция от подход, при който рискът се разглежда едва след внедряването. Тезата има концептуален характер и подлежи на последващо емпирично апробиране.

2 Теоретична и нормативна основа на Safety-by-Design

Prevention through Design се определя от NIOSH като подход за предотвратяване или намаляване на професионални увреждания чрез включване на превенцията във всички решения по проектиране, които могат да влияят върху работещите. Логиката е близка до общата йерархия на контрола: когато е възможно, опасността следва да бъде премахната или намалена при източника, преди да се разчита основно на административни мерки и лична защита [2].

Научните изследвания по PtD показват, че проектната фаза е самостоятелно поле за управление на безопасността, но същевременно предупреждават срещу прекомерно силни твърдения за ефективност без обективно измерване. Hardison and Hallowell [4] подчертават недостига на обективни данни за реалното намаляване на риска през жизнения цикъл, а Jin et al. [5] показват, че значителна част от литературата е концентрирана върху инструменти, процедури и технологични приложения. Тази методологична предпазливост е важна и при пренасянето на принципа към инженерната логистика.

ISO 12100:2010 формулира общи принципи за безопасност на машините, оценяване и намаляване на риска и към 2026 г. остава действащо издание, макар да се разработва следваща версия. Стандартът е предназначен за машини и не следва да се представя като нормативна рамка за целия склад. Неговата логика обаче е полезна при инженерното мислене: първо се търсят по-безопасни проектни решения, след това защитни мерки, а информацията за употреба остава необходим допълващ слой [6]. ISO 45001:2018 [7], допълнен с Amendment 1:2024 [8], поставя акцент върху идентифицирането на опасности, управлението на промяната, участието на работещите и йерархията на контролните мерки. ISO 31000:2018 [9] предоставя общи принципи и процес за управление на риска и остава

текущото публикувано издание, въпреки че през 2026 г. се разработва следваща редакция. За човешкото измерение на проектирането е релевантен и ISO 6385:2016 [10], който разглежда ергономичните принципи при проектиране на работни системи и баланса между човешки, технически и организационни изисквания. При автоматизирани складови решения допълнителна техническа опора дава ISO 3691-4:2023 [11] за безпилотни индустриални превозни средства и техните системи. EU-OSHA също разглежда напредналата роботика и автоматизацията като източник както на възможности за намаляване на определени опасности, така и на нови предизвикателства за безопасността и човеко-машинното взаимодействие [12]. Регламент (ЕС) 2023/1230 [13] относно машините е част от актуалния европейски контекст. Към септември 2026 г. регламентът е в сила, но общото му прилагане започва от 20 януари 2027 г., с отделни разпоредби, приложими по-рано. Поради това в настоящата публикация той се разглежда като нормативен ориентир за проектни решения, свързани с машини и свързани продукти, а не като общо правило за пространственото проектиране на складове.

3 Методологичен подход

Изследването е концептуално и има теоретико-приложна насоченост. Използвани са системен анализ, сравнителен анализ и синтез на постановки от международни стандарти, европейски нормативни източници, институционални материали и рецензирани научни публикации по Prevention through Design. Подборът на литературата е целеви и служи за обосноваване на модела; публикацията не претендира да представлява систематичен литературен обзор. Разработването на SbD-L преминава през четири логически стъпки. Първо се идентифицират проектните решения, които могат да променят профила на риска в логистичната система. Второ се групират характерни рискови ситуации, свързани с пространство, техника, човешко изпълнение и организация. Трето се структурира жизненият цикъл на проектното решение в пет етапа. Четвърто се предлага предварителна скринингова процедура, която позволява сравнение на варианти без претенция за универсална количествена оценка. На настоящия етап моделът не е апробиран в конкретна организация и не са определяни статистически валидирани тегла или прагове за приемливост. Поради това изводите се отнасят до концептуалната съгласуваност и потенциалната практическа приложимост на рамката. Като следващ етап е предвидено експертно оценяване на съдържателната валидност, разбираемостта и потенциалната приложимост на модела.

4 Рискови области при проектиране на логистични системи

Рискът в складовите и производствено-логистичните системи рядко се определя от един изолиран фактор. По-често той възниква от съчетание между пространствено решение, технически характеристики, начин на работа и организационни ограничения. Тесен маршрут например може да бъде приемлив при малък поток, но да стане критичен при едновременно движение на пешеходци, мотокари и колички. Аналогично, автоматизацията може да намали ръчните операции, но да създаде нови интерфейсни зони между хора и автономна техника. За целите на предварителното проектиране могат да се разграничат няколко групи рискови области: пресичане на пешеходни и транспортни потоци; ограничена видимост и „слепи“ точки; неподходящи маневрени пространства; нестабилност или небезопасен достъп до складирани товари; ергономично натоварване; недостатъчни буферни пространства; неподходящо осветление и сигнализация; несигурен достъп за поддръжка; неясни аварийни маршрути; взаимодействие с автоматизирани или безпилотни транспортни средства; промени в режима на работа, които не са отразени в

първоначалния проект. Тези области не представляват изчерпателен нормативен списък. Те са диагностични категории, чрез които проектният екип може да провери дали дадено решение създава скрити зависимости. Във всеки конкретен случай са приложими съответните законови изисквания, стандарти, технически спецификации и фирмени процедури.

5 Концептуален модел SbD-L за инженерната логистика

Предложеният модел SbD-L (Safety-by-Design for Logistics) организира предварителното включване на безопасността в пет взаимосвързани етапа. Моделът не е нормативна процедура, а структурираща рамка за управленска и инженерна диагностика.

Таблица 1. Пететапен модел SbD-L

Етап	Основен фокус	Ключови въпроси	Изход/документ
1. Проектно задание	Потоци, капацитет, хора, техника, ограничения	Какво ще се движи, къде, с каква интензивност и при какви ограничения?	Изисквания за безопасност в проектното задание
2. Предварителен скрининг на риска	Опасности, пресичания, критични операции	Кои проектни решения могат да създадат съществен риск?	Регистър на опасности и приоритети
3. Безопасно проектиране	Разпределение, зони, видимост, достъп, ергономия	Може ли рискът да бъде елиминиран или намален чрез самия дизайн?	Сравнение и избор на проектен вариант
4. Контрол при внедряване	Изпитвания, приемане, инструкции, обучение	Съответства ли реалното изпълнение на проектните предпоставки?	Протоколи, инструкции, коригиращи действия
5. Мониторинг и обратна връзка	Инциденти, почти-инциденти, сигнали, промени	Какво показва реалната експлоатация и какво трябва да се преработи?	Наблюдение и цикъл на подобрение

Логиката на модела е итеративна, а не линейна. Данните от внедряването и експлоатацията могат да върнат екипа към проектното задание или към избора на технически вариант. По този начин безопасността се разглежда като характеристика на жизнения цикъл на логистичната система, а не като еднократна проверка преди пускане в експлоатация.

6 Предварителен скрининг и оценяване на риска

За ранната проектна фаза е необходим инструмент, който да е достатъчно прост за сравнение на варианти, но да не създава привидна математическа точност. Поради това се предлага двустепенен скрининг. На първия етап се съчетават тежестта на възможните последствия (S) и вероятността от възникване (P) чрез ориентировъчен показател $R = S \times P$. Този показател има приоритетизираща, а не нормативна функция.

ISO 12100 и ISO 31000 не налагат универсална формула или еднакви прагове за приемливост за всички системи. Поради това числовите стойности по-долу са авторска оперативна рамка за предварително сравнение и не следва да се използват като заместител на специализирана оценка на риска. Конкретната организация трябва да съобрази критериите с приложимото законодателство, вида на оборудването, отрасловите правила и собствената си методика.

Таблица 2. Скали за тежест и вероятност при предварителен скрининг

Оценка	Тежест S	Вероятност P
1	Незначителни последствия	Рядко / малко вероятно
2	Леки последствия	По-скоро малко вероятно
3	Сериозни последствия	Възможно
4	Много сериозни последствия	Вероятно
5	Критични последствия	Често / силно вероятно

Таблица 3. Ориентировъчна матрица S × P за приоритизиране

S \ P	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

Получената стойност не определя автоматично дали рискът е „приемлив“ или „неприемлив“. Тя служи за подреждане на въпросите, които изискват по-задълбочен анализ и по-ранно проектно решение. Дори ниска числова стойност може да изисква незабавна намеса, ако е налице нормативно недопустима опасност или възможност за тежко събитие при специфични условия.

Таблица 4. Контекстуални диагностични фактори

Фактор	Диагностичен въпрос	Управленско значение
Излагане	Колко често и колко дълго хората или техниката попадат в рисковата зона?	Може да повиши приоритета на иначе рядко събитие.
Избягване	Има ли реална възможност опасността да бъде разпозната и избегната навреме?	Показва дали проектът оставя достатъчно време и пространство за реакция.
Контролни мерки	Съществуват ли конструктивни, технически и организационни бариери и колко устойчиви са те?	Насочва към предпочитане на мерки при източника пред зависимост от поведение.
Човеко-машинно взаимодействие	Има ли пресичане на функции, маршрути или зони между хора и автоматизирана техника?	Изисква анализ на интерфейси, видимост, сигнали и режими на отказ.
Поддръжка и аварийни дейности	Безопасни ли са достъпът, изолирането и действията при повреда или авария?	Предотвратява фокус само върху нормалния производствен режим.

Важен принцип е скринингът да не се извършва само от проектанта. Участието на оператори, инженери, специалисти по безопасност и здраве при работа, логистици, поддръжка и ръководители позволява проектното решение да бъде проверено спрямо

реалната работа. Това е особено важно при реконструкции, където формалният чертеж често не отразява натрупаните оперативни практики.

7 Човешкият фактор в безопасното проектиране

Safety-by-Design не трябва да се свежда до геометрия на маршрути и технически защити. Работната система включва хора с различен опит, физически възможности, внимание и реакция, които изпълняват задачи в променливи условия. ISO 6385:2016 [10] именно затова разглежда човешките, социалните и техническите изисквания като взаимосвързани при проектирането на работни системи.

В инженерната логистика проектният екип трябва да постави практически въпроси: вижда ли операторът опасността достатъчно рано; има ли достатъчно пространство за безопасна маневра; създават ли се принудителни работни пози; разбираеми ли са сигналите; възможно ли е безопасно почистване и поддръжка; как се променя задачата при отказ на автоматизацията; изисква ли нормалното изпълнение постоянно компенсиране на недостатък в дизайна чрез повишено внимание.

При автоматизирани и роботизирани системи човешкият фактор не изчезва, а променя мястото си. Намаляването на ръчните операции може да бъде съпроводено от нови задачи по наблюдение, намеса при отклонения, рестартиране и поддръжка. Затова безопасното проектиране трябва да включва не само нормалния режим, но и преходите между автоматичен и ръчен режим, отказите, техническото обслужване и непредвиденото навлизане на хора в работните зони [11], [12].

8 Дискусия и ограничения

Предложеният модел SbD-L има за цел да преведе принципа „безопасност още при проектирането“ на езика на инженерната логистика. Неговото предимство е, че подрежда проектните решения, предварителния скрининг, внедряването и последващата обратна връзка в една рамка. В този смисъл моделът може да подпомогне комуникацията между проектанти, логистици, специалисти по безопасност, оператори и ръководители.

Същевременно моделът има съществени ограничения. Първо, той не е емпирично валидиран в реален складов или производствен процес. Второ, научната литература по Prevention through Design е силно развита в строителството, докато директните изследвания в инженерната логистика са по-ограничени. Следователно пренасянето на PtD към логистични системи в настоящата публикация е концептуална адаптация, която трябва да бъде проверена чрез емпирични данни.

Трето, скрининговата стойност $S \times P$ е опростен инструмент за приоритизиране. Тя не измерва риска с универсална точност и не отчита автоматично всички фактори, които са релевантни за конкретно оборудване или процес. Поради това при високорискови дейности, машини, автономни транспортни системи, опасни вещества или специфични нормативни режими трябва да се използват съответните специализирани методики и компетентни оценки.

Четвърто, приложимостта на модела зависи от качеството на входните данни и от участието на реалните ползватели. Ако проектният екип работи само с идеализирано описание на процеса, без да отчита поддръжката, пиковото натоварване, отклоненията и реалното човешко поведение, Safety-by-Design може да остане формална процедура.

Следващ етап на изследването може да включи експертна оценка на петте етапа и диагностичните критерии, пилотно приложение при конкретна реконструкция или инвестиционен проект и сравнение на идентифицираните рискове преди и след проектната

промяна. Едва след такава проверка би било методологично оправдано да се обсъждат валидирани прагове, тегла или интегрален индекс.

9 Заключение

Безопасността в инженерната логистика се влияе от решения, взети много преди началото на експлоатацията. Пространственото разпределение, маршрутите, достъпът, изборът на техника, режимите на автоматизация и организацията на поддръжката могат да намалят риска, но могат и да създадат предпоставки, които впоследствие трудно се компенсират само с инструкции и обучение.

Предложеният модел SbD-L структурира Safety-by-Design в пет етапа - проектно задание, предварителен скрининг на риска, безопасно проектиране, контрол при внедряване и мониторинг. Предварителната оценка чрез тежест и вероятност е допълнена с контекстуални фактори, така че числовото приоритизиране да не замества инженерната преценка.

Основният смисъл на рамката е не да създаде още една формална проверка, а да постави въпроса за безопасността навреме - докато проектът все още може да бъде променен с техническо решение, а не чрез последващо компенсиране на вече заложен недостатък. Потенциалната практическа стойност на модела следва да бъде проверена чрез експертно и пилотно апробиране.

Основни резултати и научно-приложен принос

1. Систематизирана е връзката между принципа Prevention through Design и проектните решения в инженерно-логистични системи, като е отчетена границата между доказателства от други отрасли и концептуалното им пренасяне към логистиката.
2. Предложен е пететапен концептуален модел SbD-L (Safety-by-Design for Logistics), който включва проектно задание, предварителен скрининг, безопасно проектиране, контрол при внедряване и мониторинг.
3. Разработена е предварителна процедура за приоритизиране на риска чрез тежест и вероятност, допълнена с контекстуални диагностични фактори без претенция за универсален интегрален индекс.
4. Систематизирани са проектни рискови области, характерни за складови и производствено-логистични системи, включително човеко-машинно взаимодействие и автоматизирани транспортни решения.
5. Очертан е последващ етап за експертно и пилотно апробиране на съдържателната валидност, разбираемостта и потенциалната приложимост на модела.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Schulte P. A., Rinehart R., Okun A., Geraci C. L., Heidel D. S. National Prevention through Design (PtD) Initiative. Journal of Safety Research, 39(2), 2008, pp. 115–121. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2008.02.021

[2] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Prevention through Design Toolkit for the Construction Industry. DHHS (NIOSH) Publication No. 2024-124, 2024. https://doi.org/10.26616/NIOSHPUB2024124

[3] Behm M. Linking construction fatalities to the design for construction safety concept. Safety Science, 43(8), 2005, pp. 589–611. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.04.002

[4] Hardison D., Hallowell M. Construction hazard prevention through design: Review of perspectives, evidence, and future objective research agenda. Safety Science, 120, 2019, pp. 517–526. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.08.001

[5] Jin Z., Gambatese J., Karakhan A., Nnaji C. Analysis of prevention through design studies in construction: A subject review. Journal of Safety Research, 84, 2023, pp. 138–154. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.10.015

[6] International Organization for Standardization. ISO 12100:2010 Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction. ISO, 2010.

[7] International Organization for Standardization. ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. ISO, 2018.

[8] International Organization for Standardization. ISO 45001:2018/Amd 1:2024 Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use – Amendment 1: Climate action changes. ISO, 2024.

[9] International Organization for Standardization. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. ISO, 2018.

[10] International Organization for Standardization. ISO 6385:2016 Ergonomics principles in the design of work systems. ISO, 2016.

[11] International Organization for Standardization. ISO 3691-4:2023 Industrial trucks – Safety requirements and verification – Part 4: Driverless industrial trucks and their systems. ISO, 2023.

[12] European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). Advanced robotics, artificial intelligence and the automation of tasks: Definitions, uses, policies and strategies and occupational safety and health. EU-OSHA, 2022. https://doi.org/10.2802/681779

[13] European Parliament and Council. Regulation (EU) 2023/1230 of 14 June 2023 on machinery and repealing Directive 2006/42/EC and Council Directive 73/361/EEC. Official Journal of the European Union, 2023.