Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

NAUKA DLA SPOŁECZEŃSTWA

UNIWERSYTET OPOLSKI

UNIWERSYTET OPOLSKI

Raport

MODELE STRATEGICZNEJ INTEGRACJI TECHNOLOGII W MIASTACH: ANALIZA PORÓWNAWCZA POLSKI, EUROPY I ŚWIATA W PERSPEKTYWIE SMART CITY 4.0

Opracowanie:

SABINA KAUF, IWONA PISZ, SABINA WYRWICH-PŁOTKA, ANNA BRUSKA, NATALIA BOICHUK, AGNIESZKA TŁUCZAK



Spis treści

1. Wprowadzenie metodologiczne 3
2. Od rozkładu modeli do trajektorii transformacji: trzy skale, trzy logiki integracji technologii 7
3. Mechanizmy różnicowania modeli 13
4. Próg Smart City 4.0 i luka integracyjna 16
5. Konwergencja czy pluralizm? 19
6. Podsumowanie, wnioski i implikacje 24

1. Wprowadzenie metodologiczne

Niniejszy raport stanowi syntetyczne opracowanie porównawcze trzech odrębnych analiz poświęconych strategiom rozwoju miast: miast wojewódzkich w Polsce, miast europejskich oraz wybranych miast światowych reprezentujących różne regiony i konteksty rozwojowe. Celem opracowania nie jest ponowne referowanie wyników badań cząstkowych, lecz ich integracja w ramach jednej, spójnej matrycy analitycznej, umożliwiającej identyfikację zależności strukturalnych między skalą geograficzną a sposobem konceptualizacji technologii w strategiach miejskich.

Punktem wyjścia jest założenie, że inteligentny rozwój nie stanowi jednorodnego paradygmatu globalnego, lecz przyjmuje odmienne konfiguracje w zależności od dojrzałości instytucjonalnej, pozycji gospodarczej miasta oraz przyjętej architektury dokumentu strategicznego. W trzech raportach cząstkowych wykazano, że kluczowym czynnikiem różnicującym strategie nie jest sama obecność technologii cyfrowych, lecz stopień ich centralności w strukturze dokumentu, zakres integracji z sześcioma wymiarami smart city (6D) oraz sposób operacjonalizacji instrumentarium Industry 4.0.

W związku z tym w niniejszym opracowaniu przyjęto nadrzędną, trójmodelową matrycę klasyfikacyjną, obejmującą:

1. **model technologiczno-systemowy**, w którym technologia stanowi konstytutywny rdzeń wizji rozwoju i organizuje architekturę strategiczną dokumentu;
2. **model infrastrukturalno-rozwojowy**, w którym technologie cyfrowe pełnią funkcję narzędzi modernizacji sektorowej, przede wszystkim w obszarze mobilności, środowiska i infrastruktury;
3. **model planistyczno-adaptacyjny**, w którym technologia wspiera procesy planistyczne, adaptacyjne i rozwojowe, lecz nie tworzy nadrzędnej, zintegrowanej architektury danych i zarządzania.

Matryca ta została zastosowana do wszystkich trzech zbiorów badawczych, co pozwala na zachowanie porównywalności między analizami prowadzonymi w odmiennych skalach geograficznych. Klasyfikacja ma charakter jakościowo-strukturalny i opiera się na analizie treści dokumentów strategicznych, a nie na ocenie faktycznego poziomu wdrożeń technologicznych. Oznacza to, że przedmiotem badania pozostaje warstwa deklaratywno-programowa, rekonstruująca sposób, w jaki miasta konceptualizują relację między technologią, governance oraz sześcioma wymiarami smart city.

Dla zapewnienia spójności porównawczej przyjęto trzy wspólne kryteria analizy:

- **centralność technologii w architekturze dokumentu**,

- **zakres i głębokość operacjonalizacji wymiarów 6D**,
- **dywersyfikację i integrację instrumentarium Industry 4.0**.

Takie ujęcie pozwala przejść od analizy pojedynczych strategii do refleksji nad strukturą transformacji miejskiej w trzech skalach: krajowej (Polska), kontynentalnej (Europa) i globalnej. Raport ma zatem charakter metaanalityczny – jego celem jest identyfikacja wzorców konwergencji i dywergencji, określenie poziomu dojrzałości strategicznej oraz wskazanie ewentualnej luki Smart City 4.0 w ujęciu porównawczym.

W dalszych częściach opracowania przedstawione zostanie porównanie rozkładu modeli strategicznych, analiza operacjonalizacji sześciu wymiarów smart city w trzech skalach, a następnie zestawienie instrumentarium Industry 4.0 i poziomu dojrzałości technologicznej. Całość prowadzi do odpowiedzi na pytanie, czy w badanych zbiorach można mówić o konwergencji ku jednolitemu, systemowo-predykcyjnemu modelowi Smart City 4.0, czy raczej o pluralizmie trajektorii rozwojowych, różniących się stopniem integracji technologii z architekturą strategiczną miasta.

Rozszerzenie części metodologicznej wymagało doprecyzowania ram porównawczych oraz sformułowania explicite hipotez badawczych, które porządkują analizę trzech poziomów: krajowego (miasta wojewódzkie w Polsce), kontynentalnego (37 miast europejskich) oraz globalnego (11 miast światowych). Zastosowana wcześniej matryca trójmodelowa – technologiczno-systemowa, infrastrukturalno-rozwojowa oraz planistyczno-adaptacyjna – została utrzymana jako nadrzędne narzędzie klasyfikacyjne, zapewniające pełną kompatybilność trzech raportów cząstkowych.

Model technologiczno-systemowy obejmuje strategie, w których technologia stanowi konstytutywny rdzeń wizji rozwoju i organizuje architekturę dokumentu poprzez zarządzanie oparte na danych, interoperacyjność systemów oraz międzysektorową integrację 6D. Model infrastrukturalno-rozwojowy obejmuje strategie, w których technologie cyfrowe są silnie obecne, lecz pełnią przede wszystkim funkcję modernizacji infrastruktury, mobilności, środowiska i usług publicznych, bez budowy pełnej architektury predykcyjno-systemowej. Model planistyczno-adaptacyjny obejmuje strategie, w których technologia jest osadzona w planowaniu przestrzennym, klimatycznym i społecznym, ma charakter etapowy i adaptacyjny oraz nie stanowi nadrzędnej osi organizującej governance.

W celu zapewnienia metodologicznej kompatybilności trzech analiz – obejmujących miasta wojewódzkie w Polsce, miasta europejskie oraz wybrane miasta światowe – zastosowano jednolitą, trójmodelową matrycę klasyfikacyjną, obejmującą modele: technologiczno-systemowy, infrastrukturalno-rozwojowy oraz planistyczno-adaptacyjny. Klasyfikacja ta

pozwala na porównanie stopnia centralności technologii w architekturze dokumentów strategicznych niezależnie od skali terytorialnej, poziomu rozwoju czy kontekstu instytucjonalnego.

Tabela 1 syntetyzuje rozkład modeli w trzech badanych populacjach, wskazując zarówno liczbę miast przypisanych do danego modelu, jak i ich nazwy. Zestawienie to stanowi punkt wyjścia do dalszej analizy porównawczej, umożliwiając identyfikację strukturalnych podobieństw i różnic między poziomem krajowym, kontynentalnym i globalnym.

Tabela 1. Rozkład modeli strategicznego ujęcia technologii – porównanie miast polskich, europejskich i światowych

Model strategiczny	Miasta wojewódzkie w Polsce (18)	Miasta europejskie (37)	Miasta światowe (11)
Technologiczno-systemowy	2: Warszawa, Wrocław	9: Helsinki, Sztokholm, Tallinn, Londyn, Paryż, Madryt, Praga, Reykjavik, Amsterdam	2: Tokio, Nowy Jork
Infrastrukturalno-rozwojowy	10: Kraków, Gdańsk, Poznań, Łódź, Katowice, Rzeszów, Lublin, Białystok, Szczecin, Bydgoszcz	16: Berlin, Bruksela, Wiedeń, Oslo, Budapeszt, Ryga, Stambuł, Kopenhaga, Ateny, Rzym, Sofia, Skopje, Tirana, Lublana, Valletta, Zagrzeb	4: Lagos, Kapsztad, Santiago, Auckland
Planistyczno-adaptacyjny	6: Opole, Kielce, Olsztyn, Gorzów Wlkp., Zielona Góra, Toruń	12: Belgrad, Bukareszt, Bratysława, Kijów, Mińsk, Dublin, Lizbona, Wilno, Ryga, Oslo, Stambuł, Budapeszt	5: Karaczi, Sarajewo, Tbilisi, Canberra, Guatemala City

Źródło: opracowanie własne.

Analiza rozkładu modeli strategicznych w trzech badanych populacjach – miastach wojewódzkich w Polsce, miastach europejskich oraz wybranych miastach światowych – pozwala sformułować kilka istotnych wniosków dotyczących strukturalnej konwergencji i dywergencji sposobów konceptualizacji technologii w dokumentach rozwojowych.

Po pierwsze, widoczna jest wyraźna różnica w stopniu centralności technologii między poziomem krajowym a europejskim i globalnym. W przypadku miast polskich dominuje model infrastrukturalno-rozwojowy, w którym technologia pełni funkcję narzędzia wspierającego realizację celów sektorowych – przede wszystkim w obszarze mobilności, środowiska i usług publicznych. Model technologiczno-systemowy występuje incydentalnie, a jego obecność ma charakter selektywny i często koncentruje się na wybranych obszarach funkcjonalnych, bez pełnej integracji danych, governance i planowania przestrzennego w jedną architekturę strategiczną. Oznacza to, że w ujęciu krajowym transformacja cyfrowa ma w przeważającej mierze charakter operacyjny i infrastrukturalny.

W populacji miast europejskich rozkład modeli jest bardziej zrównoważony. Obok licznej grupy strategii infrastrukturalno-rozwojowych występuje wyraźna reprezentacja modelu

technologiczno-systemowego, w którym technologia staje się elementem konstytuującym wizję rozwoju miasta. W dokumentach tych cyfryzacja nie ogranicza się do wsparcia mobilności czy monitoringu środowiskowego, lecz obejmuje interoperacyjność danych, platformy miejskie, integrację polityk klimatycznych i cyfrowych oraz elementy predykcyjnego zarządzania. Jednocześnie utrzymuje się grupa strategii planistyczno-adaptacyjnych, w których technologia wpisana jest przede wszystkim w długookresowe planowanie przestrzenne i adaptację klimatyczną. Europa jawi się więc jako przestrzeń przejściowa między modernizacją infrastrukturalną a systemową transformacją w kierunku Smart City 4.0.

Największą zmienność wewnętrzną obserwujemy w grupie miast światowych. Obok ośrodków reprezentujących model technologiczno-systemowy (gdzie dane, analityka i elementy predykcyjne tworzą rdzeń architektury strategicznej) występują miasta, w których technologia służy przede wszystkim stabilizacji infrastruktury w warunkach presji demograficznej, urbanizacyjnej lub instytucjonalnej. W tej populacji wyraźnie zaznacza się także model planistyczno-adaptacyjny, silnie powiązany z zarządzaniem przestrzenią i polityką klimatyczną w długim horyzoncie. Oznacza to, że w skali globalnej smart city nie przyjmuje jednolitej formy, lecz odzwierciedla zróżnicowane trajektorie rozwojowe i odmienne punkty wyjścia instytucjonalnego.

Porównawczo można sformułować trzy kluczowe konstatacje. Po pierwsze, wraz ze wzrostem poziomu złożoności instytucjonalnej i ekonomicznej rośnie prawdopodobieństwo występowania modelu technologiczno-systemowego. Po drugie, model infrastrukturalno-rozwojowy stanowi wspólny mianownik wszystkich trzech populacji – jest obecny zarówno w miastach polskich, europejskich, jak i światowych, co wskazuje na jego uniwersalny charakter jako etapu transformacji. Po trzecie, model planistyczno-adaptacyjny pełni rolę pośrednią, łącząc technologie z polityką klimatyczną i zagospodarowaniem przestrzennym, szczególnie w miastach o silnym komponentzie długookresowego planowania.

W rezultacie rozkład modeli nie ma charakteru przypadkowego ani czysto stylistycznego. Odsłania on strukturalne różnice w sposobie rozumienia roli technologii: od narzędzia operacyjnego, przez komponent planistyczny, po konstytutywny rdzeń zarządzania opartego na danych. To właśnie ta gradacja centralności technologii stanowi oś porównawczą, która pozwala zintegrować wyniki trzech raportów w jedną, spójną narrację badawczą i stanowi fundament dalszej analizy zależności między modelem strategicznym, operacjonalizacją wymiarów 6D oraz deklarowanym instrumentarium Industry 4.0.

Powyższa interpretacja strukturalna rozkładu modeli stanowi podstawę sformułowania hipotez badawczych, które porządkują dalszą analizę porównawczą i pozwalają przejść od

deskrypcji do wyjaśnienia zależności między centralnością technologii, operacjonalizacją 6D oraz instrumentarium Industry 4.0:

H1 (hipoteza zróżnicowania strukturalnego) - Rozkład modeli strategicznego ujęcia technologii różni się istotnie między skalą krajową, kontynentalną i globalną, przy czym najwyższa koncentracja modelu technologiczno-systemowego występuje w próbie europejskiej.

H2 (hipoteza centralności technologii): Centralność technologii w architekturze strategicznej dokumentu koreluje dodatnio z głębokością operacjonalizacji sześciu wymiarów smart city (6D).

H3 (hipoteza symetrii operacjonalizacji) - Model technologiczno-systemowy charakteryzuje się większą równowagą między wymiarami 6D oraz wyższym stopniem integracji międzysektorowej niż modele infrastrukturalne i adaptacyjne.

H4 (hipoteza stabilności infrastrukturalnej): Niezależnie od modelu strategicznego i skali geograficznej, smart mobility oraz smart environment stanowią najbardziej konsekwentnie i wysoko operacjonalizowane wymiary smart city.

H5 (hipoteza luki integracyjnej Smart City 4.0): Różnice między strategiami nie wynikają z samej obecności narzędzi Industry 4.0, lecz z poziomu ich integracji międzysektorowej oraz powiązania z mechanizmami governance opartymi na danych.

Tak sformułowana rama badawcza pozwala przejść od opisu trzech odrębnych zbiorów strategii do ich rzeczywistego porównania strukturalnego. Smart City 4.0 nie jest tu traktowane jako zbiór technologii, lecz jako określona logika organizacyjna, której miarą jest integracja danych, interoperacyjność systemów oraz zdolność predykcyjno-adaptacyjna w architekturze strategicznej miasta. W dalszej części raportu hipotezy te zostaną poddane weryfikacji poprzez analizę operacjonalizacji 6D, instrumentarium Industry 4.0 oraz poziomu dojrzałości technologicznej w trzech skalach badawczych.

2. Od rozkładu modeli do trajektorii transformacji: trzy skale, trzy logiki integracji technologii

Punktem wyjścia niniejszej części raportu jest założenie, że rozkład modeli strategicznego ujęcia technologii (technologiczno-systemowego, infrastrukturalno-rozwojowego oraz planistyczno-adaptacyjnego) nie powinien być interpretowany wyłącznie jako „statyczna typologia" dokumentów. W ujęciu porównawczym stanowi on raczej wskaźnik trajektorii transformacji – to znaczy: odmiennych sposobów, w jakie miasta (w różnych skalach geograficznych) lokują technologię w architekturze rozwoju, a tym samym odmiennie

rozumieją istotę inteligentnej modernizacji. Innymi słowy, sama klasyfikacja trójmodelowa nie jest celem analizy, lecz narzędziem uchwycenia głębszej struktury: jakiego rodzaju „próg integracyjny" miasto uznaje za warunek rozwoju oraz czy technologia pełni funkcję rdzenia modelu governance, czy też pozostaje instrumentem sektorowej modernizacji.

W tym sensie rozkład modeli należy czytać jako mapę trzech logik strategicznych, które – choć współwystępują w każdej z badanych populacji – układają się w konfiguracje charakterystyczne dla skali krajowej, kontynentalnej i globalnej. W raportach cząstkowych (Polska, Europa, świat) podkreślano, że badanie ma charakter deklaratywno-strukturalny, koncentrując się na sposobie konceptualizacji technologii w strategiach, a nie na pomiarze wdrożeń. To rozróżnienie jest kluczowe: w centrum pozostaje architektura strategiczna jako forma wiedzy instytucjonalnej – sposób, w jaki miasto opisuje relacje między technologią, politykami sektorowymi, a mechanizmami koordynacji i zarządzania opartego na danych.

Najbardziej uniwersalnym elementem porównania jest fakt, że model infrastrukturalno-rozwojowy stanowi w trzech skalach swoisty „rdzeń przejściowy" – etap, który można traktować jako dominujący próg wejścia w logikę smart city w ogóle. W tym modelu technologia jest silnie obecna, ale jej funkcja jest przede wszystkim instrumentalna: wspiera modernizację infrastruktury, mobilności, środowiska, energetyki i usług publicznych. Co istotne, nie oznacza to technologicznej „słabości" strategii – przeciwnie, jest to często etap intensywnych inwestycji i wzrostu zdolności operacyjnych. Różnica polega na tym, że integracja pozostaje sektorowa: technologie są „przypisane" do domen polityk publicznych, a nie organizują całości architektury danych i koordynacji międzysektorowej.

W perspektywie porównawczej model infrastrukturalno-rozwojowy można interpretować jako logikę modernizacji funkcjonalnej: miasto rozwija inteligentne rozwiązania tam, gdzie presja efektywności i mierzalności jest największa (transport, środowisko, infrastruktura), ponieważ te obszary dostarczają relatywnie szybkich i komunikowalnych rezultatów. Ta logika jest zarazem kompatybilna z dominującą praktyką planowania publicznego, która – zwłaszcza w systemach administracyjnych o silnej sektorowości – naturalnie preferuje instrumentarium projektowe i infrastrukturalne. W tym sensie „smart" bywa tu rozumiane jako nowoczesne narzędzie realizacji polityk, a nie jako odrębny porządek organizacyjny miasta.

Drugim istotnym wzorcem jest model planistyczno-adaptacyjny, który w porównaniu pełni rolę odmienną od infrastrukturalnej modernizacji. Jego specyfika polega na tym, że technologia nie jest wprost rdzeniem architektury strategicznej, ale zostaje osadzona w procesach planowania, adaptacji i odporności – zwłaszcza tam, gdzie dominują cele długookresowe: klimatyczne, przestrzenne, społeczne. Model ten można interpretować jako trajektorię

regulacyjno-planistyczną, w której technologia jest ważna, lecz jej sens wynika z funkcji wspierania decyzji i procesów adaptacyjnych (np. monitoringu, planowania przestrzennego, modelowania zjawisk środowiskowych), a nie z budowy pełnej, zintegrowanej infrastruktury danych.

W układzie porównawczym model planistyczno-adaptacyjny jest szczególnie interesujący, ponieważ pokazuje, że nie każda droga do „inteligentności" prowadzi przez intensyfikację narzędzi Industry 4.0 w stronę predykcyjnego zarządzania. Część strategii traktuje technologię jako instrument służebny wobec logiki planowania: najpierw definiuje długookresową stabilizację systemu miasta (klimat, przestrzeń, odporność), a dopiero potem dobiera narzędzia cyfrowe jako wsparcie tej logiki. Z perspektywy Smart City 4.0 jest to trajektoria potencjalnie ambiwalentna: może stanowić etap przejściowy ku integracji systemowej (jeśli planowanie zostanie sprzężone z architekturą danych), ale może też utrwalać model, w którym cyfryzacja pozostaje „nadbudową" nad klasycznym planowaniem, bez przełomu integracyjnego.

Trzecia trajektoria – model technologiczno-systemowy – ma w porównaniu charakter jakościowo odmienny, ponieważ nie dotyczy jedynie „większej liczby technologii" ani „bardziej nowoczesnej infrastruktury". Dotyczy przede wszystkim innego rozumienia roli technologii: jako konstytutywnego rdzenia, który organizuje architekturę strategiczną dokumentu i uruchamia logikę koordynacji opartą na danych, interoperacyjności oraz integracji międzysektorowej. Ten model można interpretować jako próg organizacyjny Smart City 4.0, ponieważ przesuwa ciężar z modernizacji sektorowej na budowę miejskiej zdolności do zarządzania złożonością: łączenia polityk, danych, instytucji i procesów decyzyjnych w jeden system.

W ujęciu porównawczym istotne jest, że model technologiczno-systemowy ma charakter „rzadszy" i pojawia się tam, gdzie strategia nie tylko deklaruje wykorzystanie IoT, AI czy big data, lecz podporządkowuje im logikę governance: wskazuje potrzebę zintegrowanych platform, interoperacyjnych standardów, architektury danych miejskich, mechanizmów analitycznych oraz międzysektorowej koordynacji. To przesunięcie jest kluczowe, ponieważ oznacza, że technologia zaczyna pełnić funkcję metainfrastruktury – infrastruktury koordynacji, a nie wyłącznie infrastruktury usług.

Zastosowanie perspektywy trajektorii pozwala spojrzeć na trzy populacje nie jako na trzy „zbiory przypadków", lecz jako na trzy konfiguracje logik strategicznych.

1. Skala krajowa (Polska) ujawnia strukturę, w której modernizacja infrastrukturalna staje się dominującym sposobem konceptualizacji technologii. W konsekwencji transformacja ma w większej mierze charakter operacyjny: technologie są włączane

jako narzędzia usprawniania domen kluczowych (mobilność, środowisko, usługi), natomiast model systemowy pozostaje selektywny. Z punktu widzenia trajektorii oznacza to, że próg integracyjny Smart City 4.0 jest osiągany rzadziej, a logika sektorowa stanowi „normalną" formę inteligentnej modernizacji.

2. Skala kontynentalna (Europa) przyjmuje konfigurację bardziej „przejściową": współistnieje silna modernizacja infrastrukturalna, ale relatywnie częściej ujawnia się model technologiczno-systemowy, co sugeruje większą gotowość do rozumienia technologii jako architektury governance, a nie wyłącznie instrumentarium projektowego. Z perspektywy trajektorii Europa jawi się jako przestrzeń, w której dochodzi do napięcia między modernizacją sektorową a integracją systemową; stąd szczególne znaczenie ma pytanie nie o obecność technologii, lecz o to, czy i kiedy staje się ona zasadą organizującą polityki publiczne.
3. Skala globalna (świat) ujawnia najwyższą zmienność, co w perspektywie trajektorii oznacza współwystępowanie bardzo odmiennych punktów wyjścia: od miast zdolnych do pełnej systemowej integracji, po ośrodki, w których technologie służą stabilizacji infrastruktury lub wspieraniu adaptacji w warunkach presji urbanizacyjnej i instytucjonalnej. W konsekwencji globalny obraz smart city nie jest obrazem konwergencji, lecz wielotorowości: różne miasta przekraczają próg integracyjny w różnym tempie lub w ogóle przyjmują inną definicję tego progu.

Empiryczny rozkład modeli w trzech analizowanych populacjach ujawnia wyraźnie odmienne konfiguracje centralności technologii w architekturze strategicznej. Wśród 18 miast wojewódzkich w Polsce model technologiczno-systemowy reprezentują wyłącznie Warszawa i Wrocław. Oznacza to, że jedynie w tych dwóch przypadkach technologia została wpisana w strukturę strategii jako element organizujący wizję rozwoju i logikę zarządzania. Pozostałe miasta – w tym Kraków, Gdańsk, Poznań, Łódź, Katowice, Rzeszów, Lublin, Białystok, Szczecin i Bydgoszcz – przyjmują model infrastrukturalno-rozwojowy, w którym cyfryzacja wspiera modernizację mobilności, środowiska i usług publicznych, lecz nie konstytuuje nadrzędnej architektury danych. Z kolei Opole, Kielce, Olsztyn, Gorzów Wielkopolski, Zielona Góra i Toruń reprezentują model planistyczno-adaptacyjny, gdzie technologia pozostaje osadzona w logice planowania i adaptacji, a nie w integracji systemowej. Struktura ta wskazuje, że w skali krajowej modernizacja sektorowa stanowi dominującą formę inteligentnej transformacji, a przekroczenie progu integracyjnego ma charakter selektywny i skoncentrowany w największych ośrodkach.

W próbie 37 miast europejskich proporcje ulegają istotnemu przesunięciu. Model technologiczno-systemowy reprezentują Helsinki, Sztokholm, Tallinn, Londyn, Paryż, Madryt, Praga, Reykjavik i Amsterdam. Oznacza to, że w tych miastach technologia została podniesiona do rangi rdzenia governance, organizując strukturę strategii wokół interoperacyjności, platform danych i integracji międzysektorowej. Jednocześnie silną grupę stanowią miasta infrastrukturalno-rozwojowe, takie jak Berlin, Bruksela, Wiedeń, Oslo, Budapeszt, Ryga, Stambuł, Kopenhaga, Ateny, Rzym, Sofia, Skopje, Tirana, Lublana, Valletta i Zagrzeb, gdzie cyfryzacja wspiera domeny funkcjonalne, lecz nie reorganizuje całej architektury strategicznej. Istotna pozostaje także grupa miast planistyczno-adaptacyjnych – Belgrad, Bukareszt, Bratysława, Kijów, Mińsk, Dublin, Lizbona, Wilno, Ryga, Oslo, Stambuł i Budapeszt – w których technologia sprzężona jest przede wszystkim z planowaniem przestrzennym i adaptacją klimatyczną. Europa jawi się zatem jako przestrzeń, w której model systemowy występuje częściej niż w Polsce, lecz współistnieje z silną modernizacją sektorową i planistyczną, nie stanowiąc jeszcze dominującego standardu.

Najwyższą zmienność obserwujemy w próbie globalnej obejmującej 11 miast. Model technologiczno-systemowy reprezentują Tokio i Nowy Jork, co oznacza, że tylko w tych dwóch przypadkach technologia została jednoznacznie wpisana w architekturę zarządzania jako element konstytutywny. Lagos, Kapsztad, Santiago i Auckland przyjmują model infrastrukturalno-rozwojowy, w którym cyfryzacja służy modernizacji infrastruktury i usług. Z kolei Karaczi, Sarajewo, Tbilisi, Canberra i Guatemala City reprezentują model planistyczno-adaptacyjny, gdzie technologia wspiera procesy planistyczne i adaptacyjne. W tej konfiguracji model adaptacyjny staje się najliczniejszy, co wskazuje, że w części kontekstów globalnych inteligentność miasta definiowana jest przede wszystkim przez zdolność do zarządzania ryzykiem i presją urbanizacyjną, a nie przez budowę kompleksowej architektury danych.

Zestawienie tych trzech konfiguracji ujawnia wyraźną gradację. W Polsce model systemowy jest marginalny i skoncentrowany w Warszawie i Wrocławiu; w Europie występuje w dziewięciu miastach o silnej pozycji instytucjonalnej i gospodarczej; w skali globalnej pojawia się wyłącznie w Tokio i Nowym Jorku. Jednocześnie model infrastrukturalno-rozwojowy pozostaje wspólnym mianownikiem wszystkich trzech skal – od Krakowa i Gdańska, przez Berlin i Wiedeń, po Lagos i Santiago – co wskazuje, że modernizacja sektorowa stanowi uniwersalny etap transformacji inteligentnej. Różnice między skalami dotyczą zatem nie obecności technologii, lecz stopnia jej centralności.

Model planistyczno-adaptacyjny również przyjmuje odmienną wagę w zależności od skali. W Polsce reprezentowany jest przez sześć mniejszych ośrodków wojewódzkich, w Europie

przez dwanaście miast o zróżnicowanej pozycji instytucjonalnej, natomiast globalnie staje się najliczniejszą konfiguracją. Oznacza to, że w części kontekstów technologia pozostaje podporządkowana logice planowania i odporności, a nie logice interoperacyjnej integracji systemowej.

W konsekwencji trójmodelowa typologia może być interpretowana zarówno jako potencjalna sekwencja etapów, jak i jako zbiór alternatywnych trajektorii. Modernizacja infrastrukturalna – widoczna w większości analizowanych miast – może stanowić fundament przyszłej integracji systemowej, czego przykładami są Warszawa, Wrocław, Helsinki czy Tokio. Jednocześnie silna obecność modeli planistyczno-adaptacyjnych – w takich miastach jak Opole, Dublin czy Tbilisi – wskazuje, że inteligentna transformacja może przyjmować formę regulacyjno-planistyczną bez przejścia do pełnej architektury Smart City 4.0. Ostatecznie różnice między skalą krajową, kontynentalną i globalną nie sprowadzają się do liczby wdrażanych technologii, lecz do tego, czy – jak w Warszawie, Helsinkach czy Tokio – technologia staje się rdzeniem governance, czy też – jak w Krakowie, Berlinie czy Lagos – pozostaje instrumentem modernizacji sektorowej bądź wsparciem planowania.

Uzyskane proporcje nie mają charakteru przypadkowego ani czysto statystycznego, lecz wskazują na systemowe zróżnicowanie sposobu konceptualizacji technologii w dokumentach strategicznych trzech skal. Marginalna obecność modelu technologiczno-systemowego w próbie krajowej (2 z 18 miast), jego wyraźnie silniejsza reprezentacja w próbie europejskiej (9 z 37) oraz selektywne, lecz jakościowo znaczące występowanie w skali globalnej (Tokio i Nowy Jork) świadczą o odmiennym stopniu centralności technologii w architekturze governance. Równocześnie dominacja modelu infrastrukturalno-rozwojowego w Polsce oraz jego współdominująca rola w Europie i na świecie wskazują, że modernizacja sektorowa stanowi uniwersalny, lecz niekoniecznie docelowy etap transformacji inteligentnej. Z kolei relatywnie silna pozycja modelu planistyczno-adaptacyjnego w próbie globalnej potwierdza, że inteligentność może być konceptualizowana przede wszystkim w kategoriach stabilizacji i adaptacji, a nie systemowej integracji danych.

W konsekwencji rozkład modeli między skalą krajową, kontynentalną i globalną potwierdza hipotezę H1 o istotnym zróżnicowaniu strukturalnym. Zróżnicowanie to nie sprowadza się do odmiennej intensywności cyfryzacji, lecz dotyczy fundamentalnej kwestii: czy technologia pełni funkcję konstytutywnego rdzenia architektury strategicznej, czy też pozostaje narzędziem modernizacji sektorowej bądź wsparciem planowania. Tym samym pierwsza hipoteza znajduje potwierdzenie na poziomie struktury modeli, otwierając pole do dalszej analizy mechanizmów,

które determinują przekroczenie – lub nieprzekroczenie – progu integracyjnego Smart City 4.0 w różnych kontekstach geograficznych.

3. Mechanizmy różnicowania modeli

Zróżnicowanie strukturalne potwierdzone w poprzedniej części nie wyjaśnia jeszcze, dlaczego w jednych miastach technologia zostaje wpisana w rdzeń architektury governance, a w innych pozostaje instrumentem modernizacji sektorowej lub wsparciem planistycznym. Sam rozkład modeli – choć istotny diagnostycznie – wymaga interpretacji w kategoriach mechanizmów systemowych, które determinują zdolność do przekroczenia progu integracyjnego Smart City 4.0. Kluczowe znaczenie ma tutaj nie dostępność technologii jako takiej, lecz poziom złożoności instytucjonalnej, stopień koordynacji międzysektorowej oraz architektura zarządzania publicznego.

Pierwszym mechanizmem różnicującym jest skala i złożoność organizacyjna miasta. W analizowanej próbie krajowej model technologiczno-systemowy reprezentują wyłącznie Warszawa i Wrocław, czyli ośrodki o najwyższej koncentracji funkcji metropolitalnych, zasobów finansowych i instytucji publicznych oraz prywatnych. W próbie europejskiej model ten pojawia się w miastach o silnej pozycji gospodarczej i administracyjnej, takich jak Londyn, Paryż, Amsterdam czy Helsinki, natomiast w próbie globalnej reprezentują go Tokio i Nowy Jork – metropolie o wyjątkowo wysokim stopniu integracji funkcjonalnej i złożoności systemowej. Wspólną cechą tych ośrodków jest zdolność do koordynowania wielopoziomowych polityk publicznych, integracji danych z różnych sektorów oraz budowy platform miejskich o charakterze systemowym. Oznacza to, że model technologiczno-systemowy nie jest prostą funkcją ambicji strategicznych, lecz rezultatem określonej struktury instytucjonalnej i kompetencyjnej.

Drugim mechanizmem jest stopień sektorowości administracji publicznej. W miastach reprezentujących model infrastrukturalno-rozwojowy – takich jak Kraków, Gdańsk, Berlin, Wiedeń czy Lagos – technologia jest silnie obecna, lecz jej implementacja przebiega w ramach względnie autonomicznych domen: transportu, środowiska, energetyki czy usług cyfrowych. Integracja danych ma charakter ograniczony, a strategia nie buduje nadrzędnej architektury interoperacyjnej. Tego typu konfiguracja jest spójna z tradycyjnym, sektorowym modelem zarządzania, w którym projekty cyfrowe wzmacniają poszczególne polityki, lecz nie prowadzą do ich głębokiej integracji. Modernizacja ma charakter funkcjonalny i projektowy, a nie systemowy.

Trzecim mechanizmem różnicującym jest sposób konceptualizacji relacji między technologią a planowaniem. W miastach reprezentujących model planistyczno-adaptacyjny – takich jak Opole, Dublin, Belgrad, Sarajewo czy Tbilisi – technologia zostaje podporządkowana logice długookresowej stabilizacji i odporności. W tych strategiach cyfryzacja wspiera monitorowanie zjawisk, modelowanie scenariuszy rozwoju czy adaptację klimatyczną, jednak nie zawsze prowadzi do budowy zintegrowanej infrastruktury danych obejmującej wszystkie domeny miejskie. Oznacza to, że inteligentność miasta definiowana jest przede wszystkim przez zdolność do reagowania i adaptacji, a nie przez tworzenie predykcyjnej architektury zarządzania.

Czwartym czynnikiem jest poziom integracji polityk cyfrowych z politykami rozwoju gospodarczego. W miastach takich jak Amsterdam, Tallinn czy Tokio cyfryzacja nie jest odrębną domeną, lecz zostaje sprzężona z innowacyjnością, gospodarką danych oraz rozwojem ekosystemów technologicznych. To sprzężenie wzmacnia logikę systemową, ponieważ dane stają się zasobem nie tylko administracyjnym, lecz również gospodarczym. W modelach infrastrukturalnych i adaptacyjnych tego typu powiązanie bywa słabsze, a technologia pozostaje przede wszystkim narzędziem zarządzania publicznego.

Zestawienie tych mechanizmów pozwala sformułować ogólniejszą tezę: przekroczenie progu integracyjnego Smart City 4.0 jest funkcją zdolności instytucjonalnej do koordynacji międzysektorowej oraz budowy wspólnej architektury danych. Tam, gdzie dominuje sektorowość administracyjna, nawet zaawansowane technologie pozostają rozproszone. Tam, gdzie występuje wysoki poziom koordynacji i złożoności systemowej, technologia może zostać przekształcona w metainfrastrukturę governance.

W tym sensie różnice między skalą krajową, kontynentalną i globalną nie wynikają z odmiennego dostępu do rozwiązań Industry 4.0, lecz z odmiennych konfiguracji instytucjonalnych i organizacyjnych. Warszawa i Wrocław przekraczają próg integracyjny w warunkach rosnącej złożoności metropolitalnej; Helsinki czy Amsterdam czynią to w ramach spójnych polityk cyfrowych; Tokio i Nowy Jork w warunkach globalnej skali operacyjnej. Natomiast miasta takie jak Kraków, Berlin czy Lagos koncentrują się na modernizacji domenowej, a Opole, Dublin czy Sarajewo – na adaptacyjnym wsparciu planowania.

Mechanizmy te wskazują, że model technologiczno-systemowy nie jest naturalnym, automatycznym stadium rozwoju, lecz rezultatem określonej konfiguracji zdolności koordynacyjnych. Tym samym zróżnicowanie potwierdzone w hipotezie H1 nie ma charakteru przypadkowego ani przejściowego, lecz jest strukturalnie zakorzenione w architekturze instytucjonalnej miast. W dalszej części raportu konieczne będzie zatem sprawdzenie, czy ta

strukturalna różnica przekłada się na poziom operacjonalizacji sześciu wymiarów smart city oraz na stopień integracji instrumentarium Industry 4.0, co pozwoli przejść do weryfikacji kolejnych hipotez badawczych.

Mają powyższe na uwadze, w tabeli 2 przedstawiono syntetezę kluczowych mechanizmów różnicowania trzech modeli strategicznej integracji technologii zidentyfikowanych w analizie porównawczej. Jej celem nie jest ponowna klasyfikacja miast, lecz wskazanie strukturalnych cech odróżniających model technologiczno-systemowy, infrastrukturalno-rozwojowy oraz planistyczno-adaptacyjny. Zestawienie obejmuje stopień centralności technologii, poziom integracji międzysektorowej, charakter architektury danych oraz dominującą logikę zarządzania. Tabela powinna zostać umieszczona bezpośrednio po akapicie analizującym mechanizmy różnicowania modeli, jako syntetyczne podsumowanie części wyjaśniającej.

Tabela 2. Mechanizmy różnicowania modeli integracji technologii – ujęcie porównawcze

Model strategiczny	Typowe miasta (z próby)	Centralność technologii	Stopień integracji międzysektorowej	Architektura danych	Dominująca logika zarządzania
Technologiczno-systemowy	Warszawa, Wrocław; Helsinki, Amsterdam, Londyn, Tokio, Nowy Jork	Rdzeń strategii	Wysoka	Zintegrowana, interoperacyjna	Zarządzanie oparte na danych
Infrastrukturalno-rozwojowy	Kraków, Gdańsk; Berlin, Wiedeń; Lagos, Santiago	Narzędzie modernizacji	Umiarkowana (sektorowa)	Fragmentaryczna, domenowa	Modernizacja funkcjonalna
Planistyczno-adaptacyjny	Opole, Toruń; Dublin, Belgrad; Tbilisi, Canberra	Wsparcie planowania	Ograniczona	Selektywna, wspierająca	Planowanie i adaptacja

Źródło: opracowanie własne.

Zestawienie potwierdza, że różnice między modelami nie wynikają z samej obecności technologii, lecz z jej pozycji w architekturze strategicznej oraz stopnia integracji danych i polityk publicznych. Model technologiczno-systemowy charakteryzuje się najwyższą centralnością technologii oraz rozwiniętą interoperacyjnością, podczas gdy model infrastrukturalny pozostaje zakotwiczony w modernizacji sektorowej, a model adaptacyjny podporządkowuje technologię logice planowania. Tabela stanowi syntetyczne przejście do dalszej analizy progu integracyjnego Smart City 4.0.

Przeprowadzona analiza mechanizmów różnicowania modeli wskazuje jednoznacznie, że zasadnicze różnice między strategiami Warszawy, Helsinek czy Tokio a strategiami Krakowa, Berlina czy Lagos nie polegają na obecności bądź braku technologii cyfrowych jako takich. We

wszystkich analizowanych populacjach odnaleźć można odniesienia do rozwiązań z zakresu IoT, cyfryzacji usług publicznych czy zarządzania danymi. Kluczowe znaczenie ma jednak stopień ich integracji oraz sposób wpisania w architekturę strategiczną dokumentu. Tam, gdzie technologia zostaje podporządkowana logice interoperacyjnej i międzysektorowej (Warszawa, Helsinki, Tokio), przyjmuje ona funkcję metainfrastruktury governance. Tam natomiast, gdzie pozostaje osadzona w ramach domen funkcjonalnych (Kraków, Berlin, Lagos) bądź w logice planistyczno-adaptacyjnej (Opole, Dublin, Tbilisi), jej rola ma charakter sektorowy lub wspierający.

Oznacza to, że luka Smart City 4.0 ma charakter przede wszystkim integracyjny, a nie technologiczny. Różnice między modelami nie wynikają z liczby wdrażanych narzędzi Industry 4.0, lecz z poziomu ich powiązania z mechanizmami koordynacji i zarządzania opartego na danych. Tym samym hipoteza H5 znajduje w niniejszej części raportu wstępne potwierdzenie, które zostanie pogłębione w dalszej analizie operacjonalizacji wymiarów 6D.

4. Próg Smart City 4.0 i luka integracyjna

Przechodząc od analizy mechanizmów różnicowania modeli do kwestii operacjonalizacji sześciu wymiarów smart city (6D), konieczne jest sprawdzenie, czy zidentyfikowane wcześniej różnice strukturalne przekładają się na odmienną głębokość i symetrię integracji polityk publicznych. Innymi słowy, jeśli model technologiczno-systemowy rzeczywiście oznacza wyższy próg integracyjny, to powinien on manifestować się nie tylko w deklaracjach dotyczących danych i interoperacyjności, lecz także w bardziej równomiernym oraz pogłębionym ujęciu wymiarów smart economy, smart mobility, smart environment, smart governance, smart living i smart people. W tym miejscu raport przechodzi z poziomu struktury modeli na poziom funkcjonalny, umożliwiając weryfikację hipotez H2, H3 oraz – w pełniejszym wymiarze – H5.

Analiza porównawcza wskazuje, że w miastach reprezentujących model technologiczno-systemowy – takich jak Warszawa i Wrocław w próbie krajowej, Helsinki, Amsterdam, Londyn czy Tallinn w próbie europejskiej oraz Tokio i Nowy Jork w próbie globalnej – operacjonalizacja 6D ma charakter wyraźnie bardziej zintegrowany. W dokumentach tych technologia nie jest przypisana wyłącznie do mobilności czy środowiska, lecz stanowi spoiwo łączące polityki gospodarcze, społeczne i administracyjne poprzez wspólne odniesienia do danych, platform miejskich oraz zarządzania w czasie rzeczywistym. W efekcie wymiar smart governance nie funkcjonuje jako odrębny komponent, lecz przenika pozostałe domeny, wzmacniając ich koordynację. Podobnie smart economy nie ogranicza się do wsparcia

przedsiębiorczości, lecz bywa łączona z infrastrukturą danych i ekosystemami innowacji. Tego typu konfiguracja wskazuje na wyższą symetrię operacjonalizacji wymiarów, co oznacza, że żaden z nich nie pozostaje wyraźnie marginalizowany.

Odmienna sytuacja występuje w modelu infrastrukturalno-rozwojowym, reprezentowanym w Polsce przez Kraków, Gdańsk czy Poznań, w Europie przez Berlin, Wiedeń czy Rzym, a globalnie przez Lagos, Santiago czy Auckland. W tych przypadkach operacjonalizacja 6D jest wyraźnie asymetryczna. Najsilniej rozwinięte pozostają smart mobility oraz smart environment, które są bezpośrednio powiązane z projektami infrastrukturalnymi i modernizacyjnymi. Wymiar smart governance bywa obecny, lecz częściej w roli koordynacyjnej wobec projektów sektorowych, a nie jako nadrzędna architektura danych. Smart economy i smart people są zazwyczaj wspierane poprzez działania programowe, lecz nie zawsze zintegrowane z systemową infrastrukturą cyfrową. Taka konfiguracja potwierdza, że w modelu infrastrukturalnym technologia wzmacnia wybrane domeny, ale nie prowadzi do ich pełnej, międzysektorowej integracji.

Jeszcze inny wzorzec obserwujemy w modelu planistyczno-adaptacyjnym, reprezentowanym w Polsce przez Opole, Toruń czy Olsztyn, w Europie przez Dublin, Lizbonę czy Belgrad, a globalnie przez Sarajewo, Tbilisi czy Canberrę. W tych miastach operacjonalizacja 6D podporządkowana jest logice planowania i odporności. Silnie obecne pozostają smart environment oraz elementy smart governance związane z planowaniem strategicznym, natomiast smart economy i smart mobility nie zawsze są integrowane w ramach jednej architektury danych. Symetria wymiarów jest tu mniejsza niż w modelu systemowym, a technologia pełni funkcję wspierającą wobec długookresowych celów regulacyjnych.

Zestawienie tych trzech konfiguracji pozwala sformułować pierwszą weryfikację hipotezy H2. Analiza wskazuje, że wzrost centralności technologii w architekturze strategicznej koreluje z większą głębokością operacjonalizacji sześciu wymiarów smart city. W miastach, w których technologia stanowi rdzeń governance, wymiary 6D są nie tylko obecne, lecz powiązane poprzez wspólną infrastrukturę danych i mechanizmy koordynacyjne. W modelach infrastrukturalnych i adaptacyjnych operacjonalizacja ma charakter bardziej selektywny i sektorowy. Hipoteza H2 znajduje zatem potwierdzenie: centralność technologii sprzyja głębszej i bardziej systemowej integracji wymiarów rozwoju.

Jednocześnie analiza umożliwia weryfikację hipotezy H3, zgodnie z którą model technologiczno-systemowy powinien charakteryzować się większą równowagą między wymiarami 6D. Porównanie Warszawy, Helsinek czy Tokio z miastami infrastrukturalnymi i adaptacyjnymi wskazuje, że w modelu systemowym nie dochodzi do wyraźnej dominacji

jednej domeny kosztem pozostałych. Smart mobility i smart environment są oczywiście istotne, lecz równocześnie silnie rozwinięte pozostają smart governance i smart economy, a ich integracja odbywa się poprzez platformy danych i interoperacyjne rozwiązania cyfrowe. W modelu infrastrukturalnym natomiast mobilność i środowisko wyraźnie dominują nad pozostałymi wymiarami, co potwierdza asymetryczny charakter operacjonalizacji. Tym samym hipoteza H3 zostaje potwierdzona: model systemowy sprzyja większej symetrii i międzysektorowej równowadze.

Analiza pozwala również zweryfikować hipotezę H4. Niezależnie od modelu strategicznego i skali geograficznej, smart mobility oraz smart environment pozostają najbardziej konsekwentnie i intensywnie operacjonalizowanymi wymiarami. Występują one zarówno w Warszawie i Helsinkach, jak i w Krakowie, Berlinie czy Lagos, a także w Opolu, Dublinie czy Sarajewie. Oznacza to, że mobilność i środowisko stanowią wspólny mianownik transformacji inteligentnej, niezależnie od poziomu integracji systemowej. Hipoteza H4 znajduje zatem potwierdzenie empiryczne: to właśnie te dwa wymiary są najbardziej stabilne w trzech analizowanych skalach.

Wreszcie, w świetle powyższej analizy możliwe jest pełniejsze potwierdzenie hipotezy H5. Różnice między strategiami Warszawy, Helsinek czy Tokio a strategiami Krakowa, Berlina czy Tbilisi nie polegają na samej obecności technologii, lecz na sposobie jej powiązania z operacjonalizacją 6D. W modelu systemowym technologia integruje wymiary poprzez wspólną architekturę danych, w modelu infrastrukturalnym wzmacnia wybrane domeny, a w adaptacyjnym wspiera planowanie bez budowy metainfrastruktury interoperacyjnej. Luka Smart City 4.0 ma zatem charakter integracyjny: dotyczy poziomu koordynacji i symetrii między wymiarami, a nie liczby wdrażanych narzędzi cyfrowych. W tym sensie hipoteza H5 zostaje potwierdzona w sposób funkcjonalny, poprzez analizę relacji między centralnością technologii a strukturą 6D.

W konsekwencji przeprowadzona analiza wykazuje, że model technologiczno-systemowy wiąże się z wyższą głębokością i równowagą operacjonalizacji wymiarów smart city, podczas gdy modele infrastrukturalny i adaptacyjny utrzymują większą selektywność i sektorowość. Potwierdzenie hipotez H2, H3, H4 i H5 pozwala przejść do końcowej syntezy, w której zasadniczym pytaniem pozostaje, czy obserwowane zróżnicowanie prowadzi do konwergencji ku jednolitemu modelowi Smart City 4.0, czy raczej utrwala pluralizm trajektorii rozwojowych w skali krajowej, kontynentalnej i globalnej.

Dla uporządkowania powyższych ustaleń oraz jednoznacznego przedstawienia różnic w zakresie głębokości operacjonalizacji 6D, symetrii wymiarów, stopnia integracji danych oraz

statusu przekroczenia progu Smart City 4.0, poniżej przedstawiono syntetyczne zestawienie porównawcze, które systematyzuje wyniki weryfikacji hipotez H2–H5 (tab. 3).

Tabela 3. Model integracji technologii a próg Smart City 4.0 – synteza porównawcza

Model	Przykładowe miasta	Głębokość operacjonalizacji 6D	Symetria wymiarów	Integracja danych	Status progu Smart City 4.0
Technologiczno-systemowy	Warszawa, Wrocław; Helsinki, Amsterdam; Tokio, Nowy Jork	Wysoka	Wysoka	Interoperacyjna, międzysektorowa	Próg przekroczony
Infrastrukturalno-rozwojowy	Kraków, Gdańsk; Berlin, Wiedeń; Lagos, Santiago	Umiarkowana	Niska–umiarkowana	Sektorowa, fragmentaryczna	Próg częściowy
Planistyczno-adaptacyjny	Opole, Toruń; Dublin, Belgrad; Tbilisi, Canberra	Selektywna	Niska	Wspierająca, planistyczna	Próg nieprzekroczony

Źródło: opracowanie własne.

Ocena głębokości operacjonalizacji 6D odnosi się do zakresu, w jakim poszczególne wymiary są rozwinięte w sposób systemowy, a nie wyłącznie deklaratywny. Symetria wymiarów oznacza stopień równowagi między domenami smart economy, mobility, environment, governance, living i people – im większa równowaga, tym wyższy poziom integracji. Integracja danych opisuje, czy rozwiązania cyfrowe funkcjonują jako interoperacyjna metainfrastruktura łącząca sektory, czy też pozostają rozproszone w ramach odrębnych domen. Status progu Smart City 4.0 wskazuje, czy dany model osiąga poziom systemowej, międzysektorowej integracji opartej na danych, czy też pozostaje na etapie modernizacji funkcjonalnej lub adaptacyjnej. Dane zawarte w tabeli wskazują, że model technologiczno-systemowy wiąże się z najwyższą głębokością i symetrią operacjonalizacji 6D oraz pełną integracją danych, co uzasadnia uznanie go za przekroczenie progu Smart City 4.0. Modele infrastrukturalny i adaptacyjny charakteryzują się ograniczoną lub selektywną integracją, potwierdzając integracyjny – a nie technologiczny – charakter luki Smart City 4.0.

5. Konwergencja czy pluralizm?

Rozważając kwestię konwergencji bądź pluralizmu trajektorii rozwojowych, konieczne jest uprzednie doprecyzowanie znaczenia tych pojęć w kontekście niniejszej analizy. Przez konwergencję rozumiana jest tu nie jedynie zbieżność języka strategicznego ani powszechność

odwołań do cyfryzacji, lecz strukturalne upodobnienie architektury governance, polegające na zbliżonym stopniu centralności technologii, porównywalnej głębokości operacjonalizacji sześciu wymiarów smart city oraz integracji danych w logice międzysektorowej. Konwergencja oznaczałaby zatem, że miasta – niezależnie od skali geograficznej – przyjmują zbliżony model integracji technologii, prowadzący do systemowej, interoperacyjnej organizacji rozwoju. Z kolei przez pluralizm rozumiana jest trwała współobecność odmiennych logik strategicznych, w których technologia może pełnić funkcję konstytutywnego rdzenia governance, narzędzia modernizacji sektorowej bądź wsparcia planistyczno-adaptacyjnego. Pluralizm nie oznacza braku podobieństw, lecz brak jednolitego wzorca organizacyjnego; w tym sensie możliwa jest sytuacja współistnienia konwergencji sektorowej (np. dominacji wymiarów mobilności i środowiska) przy jednoczesnym pluralizmie strukturalnym, odnoszącym się do sposobu integracji danych i koordynacji międzysektorowej.

W analizie wyróżniono zatem cztery poziomy oceny: poziom strukturalny (rozkład modeli), funkcjonalny (operacjonalizacja 6D), sektorowy (stabilność wybranych wymiarów) oraz integracyjny (architektura danych i interoperacyjność). Odpowiedź na pytanie o konwergencję bądź pluralizm wymaga rozstrzygnięcia, na którym z tych poziomów obserwujemy zbieżność, a na którym utrzymuje się różnorodność trajektorii. Oznacza to, że rozpoznanie tendencji konwergencyjnych nie może ograniczać się do prostego porównania udziału poszczególnych modeli, lecz musi obejmować również sposób, w jaki technologia wiąże (bądź nie wiąże) domeny rozwoju miejskiego w spójną architekturę governance.

W tym miejscu kluczowe staje się rozróżnienie między konwergencją deklaratywną a konwergencją strukturalną. Konwergencja deklaratywna polega na podobnym słownictwie strategicznym i powszechności odwołań do cyfryzacji, natomiast konwergencja strukturalna dotyczy zbliżonego sposobu organizowania architektury governance wokół interoperacyjnej infrastruktury danych. Dopiero na tym drugim poziomie można mówić o rzeczywistym upodobnieniu trajektorii rozwojowych. Analiza przeprowadzona w trzech skalach wskazuje jednoznacznie, że konwergencja deklaratywna jest zjawiskiem powszechnym: zarówno w Warszawie i Wrocławiu, jak i w Krakowie, Gdańsku czy Poznaniu, podobnie jak w Helsinkach, Amsterdamie, Berlinie czy Rzymie, a także w Tokio, Nowym Jorku, Lagos czy Santiago, technologia stanowi element narracji strategicznej. Odwołania do cyfryzacji usług publicznych, danych miejskich, inteligentnej mobilności czy transformacji klimatycznej są obecne w niemal wszystkich analizowanych dokumentach, co pozwala mówić o szerokim rozpowszechnieniu paradygmatu „smart” jako języka modernizacji.

Jednakże na poziomie strukturalnym obraz jest zasadniczo odmienny. Weryfikacja hipotezy H1 wykazała, że rozkład modeli nie jest jednorodny i nie wskazuje na linearną ewolucję ku modelowi technologiczno-systemowemu. W Polsce model ten reprezentują jedynie Warszawa i Wrocław, podczas gdy pozostałe miasta wojewódzkie pozostają w logice infrastrukturalno-rozwojowej lub planistyczno-adaptacyjnej. W Europie udział modeli systemowych jest wyraźnie większy – obejmuje m.in. Helsinki, Sztokholm, Tallinn, Londyn, Paryż, Madryt, Pragę, Reykjavik i Amsterdam – lecz nadal współistnieje z silną reprezentacją modeli infrastrukturalnych (Berlin, Wiedeń, Rzym, Kopenhaga, Ateny i inne) oraz planistycznych (Dublin, Lizbona, Belgrad, Bukareszt). W próbie globalnej model systemowy ogranicza się do Tokio i Nowego Jorku, podczas gdy pozostałe miasta przyjmują logikę infrastrukturalną lub adaptacyjną. Takie zróżnicowanie potwierdza, że nie mamy do czynienia z jednokierunkowym ruchem ku jednemu wzorcowi, lecz z trwałym współistnieniem odmiennych konfiguracji.

Rozstrzygające znaczenie dla oceny konwergencji ma jednak analiza operacjonalizacji 6D i integracji danych. Weryfikacja hipotez H2 i H3 wykazała, że model technologiczno-systemowy wiąże się z wyraźnie większą głębokością i symetrią operacjonalizacji wymiarów smart city. W Warszawie, Helsinkach czy Tokio wymiary smart governance, smart economy, smart mobility i smart environment nie funkcjonują jako odrębne segmenty polityki publicznej, lecz są powiązane wspólną architekturą danych i logiką interoperacyjności. Dane stają się tu zasobem systemowym, a nie wyłącznie narzędziem sektorowym. Tymczasem w modelach infrastrukturalnych – reprezentowanych przez Kraków, Berlin czy Lagos – operacjonalizacja ma charakter asymetryczny: dominują mobilność i środowisko, podczas gdy integracja między wymiarami jest ograniczona. W modelach planistyczno-adaptacyjnych – jak Opole, Dublin czy Tbilisi – technologia wspiera planowanie i odporność, lecz nie tworzy metainfrastruktury integrującej wszystkie domeny.

Potwierdzenie hipotezy H4 wprowadza dodatkowy element zniuansowania. Smart mobility i smart environment są najbardziej stabilnymi wymiarami we wszystkich trzech skalach, niezależnie od modelu. Oznacza to, że istnieje obszar częściowej konwergencji sektorowej: miasta, bez względu na kontekst instytucjonalny, koncentrują się na mobilności i środowisku jako domenach najbardziej podatnych na mierzalne efekty technologiczne oraz najbardziej narażonych na presję klimatyczną i infrastrukturalną. Ta konwergencja ma jednak charakter funkcjonalny, nie systemowy. Nie prowadzi ona automatycznie do budowy interoperacyjnej architektury danych ani do symetrycznej integracji wszystkich wymiarów 6D.

Najistotniejsze implikacje wynikają z pełnej weryfikacji hipotezy H5. Luka Smart City 4.0, zidentyfikowana w analizie, nie polega na różnicach w dostępie do narzędzi cyfrowych.

Zarówno miasta infrastrukturalne, jak i adaptacyjne wykorzystują technologie z zakresu Industry 4.0, lecz czynią to w sposób rozproszony lub domenowy. Różnica polega na poziomie integracji i koordynacji: w modelu systemowym technologia staje się metainfrastrukturą governance, umożliwiającą zarządzanie w oparciu o dane w czasie rzeczywistym i międzysektorową synchronizację polityk. W modelach infrastrukturalnych i adaptacyjnych technologia pozostaje narzędziem modernizacji lub wsparcia planowania. Oznacza to, że Smart City 4.0 nie jest kwestią intensywności technologicznej, lecz jakości integracji organizacyjnej.

W świetle powyższych ustaleń należy stwierdzić, że obserwowany obraz nie odpowiada klasycznej tezie o konwergencji modernizacyjnej. Nie można mówić o jednolitym, globalnym przesuwaniu się miast ku modelowi technologiczno-systemowemu. Raczej mamy do czynienia z pluralizmem trajektorii, w którym model infrastrukturalno-rozwojowy stanowi wspólny, szeroko rozpowszechniony etap modernizacji, model planistyczno-adaptacyjny utrzymuje się jako trwała alternatywa w kontekstach regulacyjnych i adaptacyjnych, a model technologiczno-systemowy wyłania się selektywnie w miastach o wysokiej złożoności instytucjonalnej i zdolności koordynacyjnej.

Pluralizm ten nie oznacza jednak całkowitej fragmentacji. Wspólny język cyfryzacji, powszechność odniesień do mobilności i środowiska oraz rosnąca rola danych wskazują na istnienie ramy normatywnej, w której miasta formułują swoje strategie. Jednakże sposób przekładania tej ramy na architekturę governance pozostaje zróżnicowany. Ostateczna odpowiedź na pytanie postawione w tytule brzmi zatem następująco: w wymiarze sektorowym obserwujemy częściową konwergencję, natomiast w wymiarze integracyjnym i organizacyjnym dominuje pluralizm strukturalny. Smart City 4.0 jawi się nie jako nieuchronny etap ewolucji wszystkich miast, lecz jako specyficzny próg integracyjny, przekraczany w określonych warunkach instytucjonalnych i metropolitalnych, a nie jako uniwersalne stadium rozwoju.

Powyższe rozstrzygnięcia – obejmujące potwierdzenie zróżnicowania strukturalnego (H1), zależności między centralnością technologii a głębokością i symetrią operacjonalizacji 6D (H2, H3), stabilności wymiarów mobilności i środowiska (H4) oraz integracyjnego charakteru luki Smart City 4.0 (H5) – prowadzą do wniosku, że odpowiedź na pytanie o konwergencję lub pluralizm nie może być formułowana w kategoriach dychotomicznych. Mamy bowiem do czynienia z częściową konwergencją sektorową przy jednoczesnym utrzymaniu pluralizmu strukturalnego i integracyjnego. Dla syntetycznego uporządkowania tych wielopoziomowych ustaleń oraz jednoznacznego wskazania charakteru tendencji w poszczególnych warstwach

analizy poniżej przedstawiono tabelaryczne zestawienie wyników, które integruje wnioski całego raportu i porządkuje je w perspektywie odpowiedzi na pytanie zasadnicze.

Syntetyczne podsumowanie całej analizy porównawczej stanwoi tab. 4, która porządkuje wnioski dotyczące poziomu konwergencji między skalą krajową, kontynentalną i globalną oraz wskazuje, w jakim zakresie obserwujemy upodobnienie trajektorii rozwojowych, a w jakim utrzymuje się pluralizm modeli integracji technologii.

Kolumna „Poziom analizy" odnosi się do kolejnych warstw badania: strukturalnej (rozkład modeli), funkcjonalnej (operacjonalizacja 6D), sektorowej (stabilność wymiarów) oraz integracyjnej (architektura danych). Kolumna „Charakter tendencji" wskazuje, czy w danym wymiarze przeważa konwergencja czy pluralizm. Kolumna „Status hipotezy" odzwierciedla wynik jej weryfikacji w toku raportu.

Tabela 4. Konwergencja czy pluralizm? – syntetyczne ujęcie wyników analizy

Poziom analizy	Główne ustalenie	Charakter tendencji	Status hipotezy
Strukturalny (rozkład modeli)	Istotne różnice między Polską, Europą i światem w udziale modelu systemowego	Pluralizm	H1 – potwierdzona
Funkcjonalny (operacjonalizacja 6D)	Wyższa centralność technologii = większa głębokość i symetria 6D	Warunkowa konwergencja	H2, H3 – potwierdzone
Sektorowy (stabilność wymiarów)	Smart mobility i smart environment obecne we wszystkich modelach	Częściowa konwergencja	H4 – potwierdzona
Integracyjny (architektura danych)	Luka dotyczy poziomu interoperacyjności i koordynacji, nie obecności technologii	Pluralizm strukturalny	H5 – potwierdzona
Ogólna trajektoria rozwoju	Smart City 4.0 jako próg selektywny, nieuniwersalne stadium	Pluralizm z elementami konwergencji sektorowej	Synteza końcowa

Źródło: opracowanie własne.

Zestawienie ujęte w tabeli prowadzi do jednoznacznego, lecz wielowymiarowego wniosku:

1. na poziomie strukturalnym dominuje pluralizm – rozkład modeli w Polsce, Europie i w próbie globalnej nie wykazuje tendencji do jednoznacznego przesuwania się w stronę modelu technologiczno-systemowego. Oznacza to, że nie obserwujemy liniowej ewolucji ku jednolitej architekturze Smart City 4.0. Różnice w udziale modelu systemowego między skalą krajową, kontynentalną i globalną mają charakter trwały i wynikają z odmiennych konfiguracji instytucjonalnych, a nie z przejściowego stadium rozwoju.
2. na poziomie funkcjonalnym widoczna jest warunkowa konwergencja. Dane zawarte w tabeli wskazują, że wzrost centralności technologii wiąże się z większą głębokością i symetrią operacjonalizacji 6D. Model technologiczno-systemowy konsekwentnie łączy wyższy poziom integracji danych z równomiernym rozwinięciem wymiarów smart governance, smart economy, smart mobility i smart environment. W tym sensie potwierdzona została zależność między integracją technologiczną a integracją polityk publicznych. Nie oznacza

to jednak, że wszystkie miasta podążają w tym samym kierunku; oznacza raczej, że istnieje określona logika systemowa, której osiągnięcie zależy od spełnienia określonych warunków organizacyjnych.

3. Dane zawarte w tabeli jednoznacznie potwierdzają częściową konwergencję sektorową. Smart mobility oraz smart environment pozostają najbardziej stabilnymi i konsekwentnie operacjonalizowanymi wymiarami we wszystkich modelach. Niezależnie od tego, czy miasto przyjmuje logikę systemową, infrastrukturalną czy adaptacyjną, obszary mobilności i środowiska stanowią rdzeń modernizacji. Wskazuje to na wspólną presję infrastrukturalno-klimatyczną, która przekracza różnice instytucjonalne i prowadzi do funkcjonalnego upodobnienia strategii.
4. na poziomie integracyjnym dominuje pluralizm strukturalny. Tabela pokazuje, że różnice między modelami nie dotyczą obecności technologii, lecz sposobu jej osadzenia w architekturze danych i mechanizmach koordynacji. Tylko w modelu technologiczno-systemowym technologia przyjmuje formę interoperacyjnej metainfrastruktury governance. W modelach infrastrukturalnych i adaptacyjnych pozostaje ona rozproszona lub podporządkowana planowaniu. Oznacza to, że luka Smart City 4.0 ma charakter integracyjny, a nie technologiczny – co stanowi najważniejsze ustalenie całej analizy.

W konsekwencji analiza zapisów strategii rozwoju miast nie rozstrzyga sporu między konwergencją a pluralizmem w sposób binarny, ile pokazuje ich współwystępowanie na różnych poziomach. Konwergencja ujawnia się przede wszystkim w wymiarze sektorowym i deklaratywnym, natomiast pluralizm utrzymuje się na poziomie struktury modeli i architektury integracyjnej. Smart City 4.0 jawi się zatem jako selektywny próg organizacyjny, osiągany w określonych konfiguracjach instytucjonalnych, a nie jako uniwersalne stadium ewolucji wszystkich miast.

6. Podsumowanie, wnioski i implikacje

Przeprowadzona analiza porównawcza strategii miast wojewódzkich w Polsce, miast europejskich oraz wybranych miast światowych prowadzi do wniosku, że inteligentna transformacja nie ma charakteru jednorodnego ani linearnie konwergencyjnego. Zróżnicowanie modeli integracji technologii – technologiczno-systemowego, infrastrukturalno-rozwojowego oraz planistyczno-adaptacyjnego – nie stanowi wyłącznie wariantu stylistycznego dokumentów strategicznych, lecz odzwierciedla odmienne konfiguracje instytucjonalne i różne sposoby konceptualizacji relacji między technologią a governance.

Analiza potwierdza istnienie wyraźnego zróżnicowania strukturalnego między skalą krajową, kontynentalną i globalną. Model technologiczno-systemowy pozostaje rozwiązaniem selektywnym i koncentruje się przede wszystkim w miastach o wysokiej złożoności instytucjonalnej i metropolitalnej, takich jak Warszawa, Helsinki czy Tokio. W przypadku miast wojewódzkich w Polsce dominującą logiką pozostaje modernizacja infrastrukturalna, Europa prezentuje konfigurację bardziej zrównoważoną i przejściową, natomiast w skali globalnej obserwujemy najwyższą zmienność konfiguracji strategicznych. Układ ten nie wskazuje na jednokierunkową ewolucję ku modelowi Smart City 4.0, lecz na utrwalony pluralizm trajektorii, uwarunkowany odmiennymi strukturami governance i poziomem integracji systemowej.

Równocześnie ujawnia się wyraźna zależność między centralnością technologii a głębokością integracji sześciu wymiarów smart city. Tam, gdzie technologia organizuje architekturę strategiczną i stanowi element konstytutywny modelu zarządzania, operacjonalizacja 6D przyjmuje formę bardziej symetryczną i międzysektorowo powiązaną. W takich konfiguracjach dane przestają być narzędziem domenowym, a zaczynają pełnić funkcję metainfrastruktury koordynacyjnej. Smart City 4.0 nie jawi się zatem jako zbiór rozproszonych rozwiązań cyfrowych, lecz jako określony próg integracyjny, w którym technologia zostaje włączona w rdzeń governance i organizuje relacje między politykami publicznymi.

Jednocześnie w całym badanym spektrum miast widoczna jest stabilność wymiarów mobilności i środowiska, które stanowią najbardziej konsekwentnie operacjonalizowane obszary transformacji. Ta częściowa konwergencja sektorowa wskazuje na wspólną presję infrastrukturalno-klimatyczną jako czynnik modernizacyjny przekraczający różnice instytucjonalne i geograficzne. Nie prowadzi ona jednak do pełnej konwergencji systemowej, ponieważ integracja pozostałych wymiarów – zwłaszcza governance i economy – pozostaje zróżnicowana. Ostatecznie oznacza to, że wspólny język i wspólne domeny modernizacji nie przekładają się automatycznie na jednolitą architekturę zarządzania.

Najważniejszym wnioskiem o charakterze teoretycznym jest identyfikacja luki Smart City 4.0 jako luki integracyjnej, a nie technologicznej. Różnice między strategiami nie wynikają z liczby narzędzi Industry 4.0, lecz z poziomu ich interoperacyjności i włączenia w architekturę governance. Tym samym Smart City 4.0 należy rozumieć jako model organizacyjny oparty na integracji danych, a nie jako etap intensyfikacji cyfryzacji.

W świetle powyższych ustaleń można sformułować trzy implikacje:

1. dla badań nad inteligentnymi miastami konieczne jest przesunięcie akcentu z pomiaru wdrożeń technologicznych na analizę architektury integracyjnej strategii. Kluczowe pytanie

nie brzmi „ile technologii?”, lecz „w jaki sposób technologia organizuje relacje między domenami polityki miejskiej?”.

2. dla praktyki planowania strategicznego istotne staje się świadome definiowanie progu integracyjnego. Miasta pozostające w modelu infrastrukturalnym nie są „mniej inteligentne”, lecz znajdują się na innym etapie konfiguracji systemowej. Przejście ku Smart City 4.0 wymaga jednak nie tyle kolejnych projektów technologicznych, ile budowy interoperacyjnej architektury danych oraz mechanizmów międzysektorowej koordynacji.
3. pluralizm trajektorii należy traktować nie jako deficyt, lecz jako strukturalną cechę współczesnej transformacji miejskiej. Oznacza to, że polityki publiczne nie powinny zakładać jednego uniwersalnego wzorca, lecz uwzględniać różne punkty wyjścia instytucjonalnego i różne konfiguracje governance.

Ostatecznie raport prowadzi do konkluzji, że Smart City 4.0 nie jest nieuchronnym stadium ewolucji wszystkich miast, lecz selektywnym progiem organizacyjnym, którego osiągnięcie zależy od zdolności do integracji danych, polityk i instytucji w spójną architekturę zarządzania. Inteligentna transformacja przyjmuje zatem postać współistnienia częściowej konwergencji sektorowej z trwałym pluralizmem strukturalnym.