



Blood Supply Chain Design Network Based on The National Blood Supply Network, Reliability, and Prioritization of The Use of Compatible Blood Groups Using NSGA-II and MOICA

Amir Hossein Doulatyari¹ and Parvaneh Samouei²

1. MSc., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: a.doulatyari@eng.basu.ac.ir
2. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: p.samouei@basu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 12 March 2024 Received in revised form 16 August 2025 Accepted 21 October 2025 Published online 1 December 2025 Keywords: Blood group compatibility, Encouragement in the blood supply chain, National blood supply network, Prioritization, Reliability	Disasters, especially earthquakes, have adverse consequences such as destruction, loss of life, and weakening of the effectiveness of health services, and a significant challenge after a devastating earthquake is how to provide blood for the affected people. In this paper, a multi-objective mathematical model and algorithms are presented to a blood supply chain network design considering temporary and permanent collection centers, regional and field hospitals in order to reduce costs with respect to reliability. In addition, the use of the national blood supply network, blood group compatibility, and incentive policy are considered. In this model, the amount of blood collected from donors, the number and location of blood collection centers, and the amount of blood in each center and hospital are verified. Furthermore, in order not to waste time and save the lives of the injured, especially in the early hours of the crisis, blood transfer has been planned both by ambulance and helicopter. To evaluate the model in small dimensions, the problem has been solved with GAMS, and sensitivity analysis has been performed on the main parameters. To solve the problem in large dimensions, NSGA-II and MOICA algorithms have been used, and the Taguchi method has been used to adjust the parameters. A comparison of five evaluation indicators shows that the NSGA-II algorithm usually provides better results than the MOICA algorithm.
Cite this article: Doulatyari, A. & et al, (2025)., Blood Supply Chain Design Network Based on The National Blood Supply Network, Reliability, and Prioritization of The Use of Compatible Blood Groups Using NSGA-II and MOICA. <i>Engineering Management and Soft Computing</i>, 11 (2). Error! Bookmark not defined.42-177. DOI: https://doi.org/10.22091/jemsc.2025.12368.1258	
© Doulatyari and Samouei (2025) DOI: https://doi.org/10.22091/jemsc.2025.12368.1258 Publisher: University of Qom	

1) INTRODUCTION

The need for blood in times of crisis increases as one of the vital factors for humans. In this regard, various researchers have addressed the blood supply chain. For example, Asadpour et al. (2020) studied the blood supply chain in crises by considering blood groups and expiration dates. Fahmi Hassan et al. (2020) used data mining based on decision tree, KNN, SVM, and MLP algorithms to predict blood donation. Hosseini Motlagh et al. (2020) considered blood spoilage, blood group substitutability, and blood characteristics based on the blood age. However, designing a blood supply chain for a disaster condition is a complex issue, considering reliability, use of the national blood supply network, compatibility of blood groups, and incentive policies. Incentive policies such as promoting a culture of blood donation can help attract and retain blood donors. In addition to appropriate distribution, the blood age should be considered. Because some patients need to use fresh blood (blood that has been donated for at least 10 days), but some patients can use normal blood that has been donated for up to 32 days. In this regard, managers, by establishing a national blood transfusion network, assign provinces to each province based on geographical location, rural population, etc., to avoid blood shortages. However, no study has been found that considers these issues together.

2) PROBLEM DEFINITION

This paper designs a blood supply chain network including donors, blood collection centers (permanent and temporary), regional hospitals, field hospitals, and specific provinces that can provide sufficient blood supply after a crisis. In designing this network, in addition to implementing incentive policies for donation, attention should be paid to the compatibility and priority of using blood groups according to Table 1.

Table 1. Blood code, compatibility and priorities

code	Patient's blood type	Blood donor type							
		O-	O+	A-	A+	B-	B+	AB-	AB+
1	O-	1							
2	O+	2	1						
3	A-	2		1					
4	A+	4	3	2	1				
5	B-	2				1			
6	B+	4	3			2	1		
7	AB-	4		2		3		1	
8	AB+	8	7	5	3	6	4	2	1

3) MATHEMATICAL MODELLING

The components of the proposed model are as follows

i	Donation points	Indexes:	HM_m	regional hospital Holding Cost of each unit of blood in m
		HN_n	n	Holding Cost of each unit of blood in field hospital

j	Temporary blood collection centers	BK_k	Capacity of the permanent blood collection center k
n	Field hospitals	CJ_j	Setup cost of temporary blood collection center j
a	Blood age	Tf	Maximum lifespan of fresh blood
k	Permanent blood collection centers	$CapV_v$	vehicle v Capacity of
m	Regional hospital	R	The maximum coverage radius
t	periods	$CapJ_j$	j Temporary blood collection center capacity
v	Vehicles	$CapK_k$	k Permanent blood collection center capacity
e, e'	Blood groups		
Parameters:		Decision variables:	
HK_k	Holding cost of each blood unit in the center k permanent	SIK_{iket}	The amount of fresh blood type e transferred between donation point i and permanent center k in period t
$DisI_{ij}$	the blood donation point Distance between the temporary center j and i	SJK_{jket}	The amount of fresh blood type e transferred between temporary center j and permanent center k in period t
$DisIK_{ik}$	the blood donation point Distance between the permanent center k and i	SIJ_{ijet}	The amount of fresh blood type e transferred between donation point i and temporary center k in period t
DMF_{met}	The amount of fresh type e demand in period t . in m regional hospital	$InvM_{maet}$	The amount of inventory of blood type e at age a in regional hospital m in period t
DMN_{met}	The amount of fresh or normal type e period t . in m regional hospital demand in	$InvN_{naet}$	The amount of inventory of blood type e at age a in field hospital n in period t
DNF_{net}	field The amount of fresh type e demand in period t . in m hospital	$InvK_{kaet}$	The amount of inventory of blood type e at age a in permanent center k in period t
DNN_{net}	The amount of fresh or normal type e period t . n in demand in field hospital	YJ_{ij}	assigned to are_i Binary; 1 if the blood donors in region otherwise 0. j , temporary center
CJK_{jkv}	between v Fixed cost of using vehicle permanent center the and j temporary center k	YK_{ik}	assigned to are_i Binary; 1 if the blood donors in region otherwise 0. k , permanent center

CKM_{kmv}	between v Fixed cost of using vehicle m regional hospital and k permanent center	YIJ_{ijt}	assigned to are i Binary; 1 if the blood donors in region in period, otherwise 0. j temporary center
CMN_{mnv}	between v Fixed cost of using vehicle and field hospital nm hospital regional	YIK_{ikt}	assigned to are i Binary; 1 if the blood donors in region k in period, otherwise 0. permanent center
$GD_{e,e'}$	Compatibility between different blood e' and groups e	YJK_{jkt}	is assigned to permanent j Binary; 1 if temporary center in period t , otherwise 0. k center
Sup_{ie}	e The maximum amount of blood type e that be donated in point i	YKM_{kmt}	Binary; 1 if permanent center k is assigned to regional hospital m in period t , otherwise 0.
XJK_{jk}	1 if temporary center j can send blood to permanent center k , otherwise 0	YMN_{mnt}	Binary; 1 if regional hospital m is assigned to field hospital n in period t , otherwise 0.
XKM_{km}	1 if permanent center k can send blood to m , otherwise 0 regional hospital	SKM_{kmaet}	The amount of blood type e at age a transferred between and regional hospital m in period t . k permanent center
$InvK0_{kae}$	The initial inventory of blood type e at age a center k . in permanent	SMN_{mnaet}	The amount of blood type e at age a transferred between regional hospital m and field hospital n in period t .
$InvM0_{mae}$	The initial inventory of blood type e at age a in regional hospital m .	X_{mn}	Binary; 1 if field hospital n is supplied by regional hospital m , otherwise 0.
$InvN0_{nae}$	The initial inventory of blood type e at age a in field hospital n	XJ_j	utilized, otherwise is j Binary; 1 if the temporary center .0
Co_{ie}	The incentive price to encourage donation point i to receive blood type e	NJK_{jkvt}	Number of vehicle v used between temporary center in period t . k and permanent center j
RMN_{mnv}	travel between regional can v 1 if vehicle otherwise 0 n , field hospital hospital m and	NMN_{mnvt}	Number of vehicle v used between regional hospital m n in period t . and field hospital
BIK_{ik}	Average reliability in terms of road conditions and transportation safety between permanent center k and i donation point	NKM_{kmvt}	Number of vehicle v used between permanent center k and regional hospital m in period t
BJK_{jk}	Average reliability in terms of road conditions and transportation safety between permanent center k temporary center j and	$OMF_{maee't}$	at age a to meet e' The amount of used fresh blood type m in in regional hospital e demand of blood type the period t
BKM_{km}	Average reliability in terms of road conditions and transportation safety between m hospital permanent center k and regional	$OMN_{maee't}$	at age e' The amount of used fresh or normal blood type in regional hospital e demand of blood type a to meet the m in period t
BMN_{mn}	Average reliability in terms of road conditions and transportation safety between and field hospital nm hospital regional	$ONF_{nae'et}$	at age a to meet e' The amount of used fresh blood type m in period t in field hospital e demand of blood type the
BIJ_{ij}	Average reliability in terms of road conditions and transportation safety between and temporary center ki donation point	$ONN_{nae'et}$	at age e' The amount of used fresh or normal blood type m in field hospital e demand of blood type a to meet the in period t

3-1) MATHEMATICAL MODEL

The mathematical model is given as follows:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 = & \sum_j Cj_j * Xj_j + \sum_k \sum_a \sum_e \sum_t HK_k * InvK_{kaet} + \sum_m \sum_a \sum_e \sum_t HM_m * InvM_{maet} + \sum_n \sum_a \sum_e \sum_t HN_n * InvN_{naet} + \\ & \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t CJK_{jkv} * NJK_{jkvt} + \sum_k \sum_m \sum_v \sum_t CKM_{kmv} * NKM_{kmvt} + \sum_m \sum_n \sum_v \sum_t CMN_{mnv} * NMN_{mnvt} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_e \sum_t Co_{ie} * SIJ_{ijet} + \sum_i \sum_k \sum_e \sum_t Co_{ie} * SIK_{iket} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Max } Z_2 = & \sum_i \sum_j \sum_t BIJ_{ij} * YIJ_{ijt} + \sum_i \sum_k \sum_t BIK_{ik} * YIK_{ikt} + \sum_j \sum_k \sum_t BJK_{jk} * YJK_{jkt} + \sum_k \sum_m \sum_t BKM_{km} * YKM_{kmt} + \\ & \sum_m \sum_n \sum_t BMN_{mn} * YMN_{mnt} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Min } Z_3 = \sum_m \sum_a \sum_e \sum_{e'} Pri_{e'} * (OMF_{maee't} + OMN_{maee't}) + \sum_n \sum_a \sum_e \sum_{e'} Pri_{e'} * (ONF_{naee't} + ONN_{naee't}) \quad (3)$$

S.to:

$$\sum_j YJ_{ij} + \sum_k YK_{ik} \leq 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_i YJ_{ij} \leq M * XJ_j \quad \forall j \quad (5)$$

$$DisIJ_{ij} * YJ_{ij} \leq R \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$DisIK_{ik} * YK_{ik} \leq R \quad \forall i, k \quad (7)$$

$$\sum_j \sum_t SIJ_{ijet} + \sum_k \sum_t SIK_{iket} \leq Sup_{ie} \quad \forall i, e \quad (8)$$

$$\sum_i \sum_e SIJ_{ijet} \leq CapJ_j \quad \forall j, t \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_e SIK_{iket} \leq CapK_k \quad \forall k, t \quad (10)$$

$$\sum_e \sum_t SIJ_{ijet} \leq M * YJ_{ij} \quad \forall i, j \quad (11)$$

$$\sum_e \sum_t SIK_{iket} \leq M * YK_{ik} \quad \forall i, k \quad (12)$$

$$\sum_i SIJ_{ijet} = \sum_k SJK_{jket} \quad \forall j, e, t \quad (13)$$

$$SJK_{jket} \leq M * XJK_{jk} \quad \forall j, k, e, t \quad (14)$$

$$InvK_{kae(t1)} = InvK0_{kae} - \sum_m SKM_{kmae(t1)} \quad \forall k, a, e \quad (15)$$

$$InvK_{k(a1)et} = \sum_i SIK_{ike(t-1)} + \sum_j SJK_{jke(t-1)} - \sum_m SKM_{km(a1)et} \quad \forall k, e, t | t \geq 2 \quad (16)$$

$$InvK_{kaet} = InvK_{k(a-1)e(t-1)} - \sum_m SKM_{kmaet} \quad \forall k, a | a \geq 2, e, t | t \geq 2 \quad (17)$$

$$SKM_{kmaet} \leq M * XKM_{km} \quad \forall k, m, a, e, t \quad (18)$$

$$InvM_{mae(t1)} = InvM0_{mae} + \sum_k SKM_{kmae(t1)} - \sum_n SMN_{mnae(t1)} - \sum_{e'} OMF_{mae'e(t1)} - \sum_{e'} OMN_{mae'e(t1)} \quad \forall m, a, e \quad (19)$$

$$InvM_{m(a1)et} = \sum_k SKM_{km(a1)et} - \sum_n SMN_{mn(a1)et} - \sum_{e'} OMF_{m(a1)e'tet} - \sum_{e'} OMN_{m(a1)e'tet} \quad \forall m, e, t | t \geq 2 \quad (20)$$

$$InvM_{maet} = InvM_{m(a-1)e(t-1)} + \sum_k SKM_{kmaet} - \sum_n SMN_{mnaet} - \sum_{e'} OMF_{mae'et} - \sum_{e'} OMN_{mae'et} \quad \forall m, a | a \geq 2, e, t | t \geq 2 \quad (21)$$

$$\sum_{a|a \leq Tf} \sum_{e'} OMF_{maee't} \geq DMF_{met} \quad \forall m, e, t \quad (22)$$

$$OMF_{maee't} \leq M * GD_{ee'} \quad \forall m, a, e, e', t \quad (23)$$

$$OMF_{maee't} = 0 \quad \forall m, a, e, e', t | t > Tf \quad (24)$$

$$\sum_a \sum_{e'} OMN_{maee't} \geq DMN_{met} \quad \forall m, e, t \quad (25)$$

$$OMN_{maee't} \leq M * GD_{ee'} \quad \forall m, a, e, e', t \quad (26)$$

$$\sum_m X_{mn} = 1 \quad \forall n \quad (27)$$

$$\sum_a \sum_e \sum_t SMN_{mnaet} \leq M * X_{mn} \quad \forall m, n \quad (28)$$

$$InvN_{nae(t1)} = InvN_{0nae} + \sum_m SMN_{mnae(t1)} - \sum_{e'} ONF_{nae'e(t1)} - \sum_{e'} ONN_{nae'e(t1)} \quad \forall n, a, e \quad (29)$$

$$InvN_{n(a1)et} = \sum_m SMN_{mn(a1)et} - \sum_{e'} ONF_{n(a1)e'et} - \sum_{e'} ONN_{n(a1)e'et} \quad \forall n, e, t | t \geq 2 \quad (30)$$

$$InvN_{naet} = InvN_{n(a-1)e(t-1)} + \sum_m SMN_{mnaet} - \sum_{e'} ONF_{nae'et} - \sum_{e'} ONN_{nae'et} \quad \forall n, a | a \geq 2, e, t | t \geq 2 \quad (31)$$

$$\sum_{a|a \leq Tf} \sum_{e'} ONF_{naee't} \geq DNF_{net} \quad \forall n, e, t \quad (32)$$

$$ONF_{naee't} \leq M * GD_{ee'} \quad \forall n, a, e, e', t \quad (33)$$

$$ONF_{naee't} = 0 \quad \forall n, a, e, e', t | t > Tf \quad (34)$$

$$\sum_a \sum_{e'} ONN_{naee't} \geq DNN_{net} \quad \forall n, e, t \quad (35)$$

$$ONN_{naee't} \leq M * GD_{ee'} \quad \forall n, a, e, e', t \quad (36)$$

$$\sum_e SIJ_{ijet} \geq YIJ_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (37)$$

$$\sum_e SIK_{iket} \geq YIK_{ikt} \quad \forall i, k, t \quad (38)$$

$$\sum_e SJK_{jket} \geq YJK_{jkt} \quad \forall j, k, t \quad (39)$$

$$\sum_a \sum_e SKM_{kmaet} \geq YKM_{kmt} \quad \forall k, m, t \quad (40)$$

$$\sum_a \sum_e SMN_{mnaet} \geq YMN_{mnt} \quad \forall m, n, t \quad (41)$$

$$\sum_e SJK_{jket} \leq CapV_{(v1)} * NJK_{jk(v1)t} \quad \forall j, k, t \quad (42)$$

$$\sum_a \sum_e SKM_{kmaet} \leq \sum_v CapV_v * NKM_{kmvt} \quad \forall k, m, t \quad (43)$$

$$\sum_a \sum_e SMN_{mnaet} \leq \sum_v CapV_v * NMN_{mnvt} \quad \forall m, n, t \quad (44)$$

$$NMN_{mnvt} \leq M * RMN_{mnv} \quad \forall m, n, v, t \quad (45)$$

$$\sum_a \sum_e InvK_{kaet} \leq BK_k \quad \forall k, t \quad (46)$$

$$\sum_a \sum_e InvM_{maet} \leq BM_m \quad \forall m, t \quad (47)$$

$$\sum_a \sum_e InvN_{naet} \leq BN_n \quad \forall n, t \quad (48)$$

$$YMN_{mnt}, YKM_{kmt}, YJK_{jkt}, YIK_{ikt}, YIJ_{ijt}, YK_{ik}, YJ_{ij}, XJ_j, X_{mn} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, n, k, m, t \quad (49)$$

$$SIJ_{ijet}, SIK_{iket}, SJK_{jket}, SKM_{kmaet}, SMN_{mnaet}, InvK_{kaet}, InvM_{maet}, InvN_{naet} \quad \forall i, j, e, a, e', n, k, m, t \quad (50)$$

$$OMF_{maee't}, OMN_{maee't}, ONF_{nae'et}, ONN_{nae'et} \geq 0 \quad \forall j, k, v, t, m, n \quad (51)$$

$$NJK_{jkvt}, NKM_{kmvt}, NMN_{mnvt} \geq 0 \text{ and Integer}$$

Eq. (1) minimizes the sum of various costs. Eq. (2) maximizes the average reliability of blood transfusion to different centers. Eq. (3) tries to use blood that has higher priority wherever possible. Eq. (4) ensures that each donation point is assigned to at most one permanent or temporary center. Eq. (5) states that blood can be donated to a temporary blood center if that center has been established. Equations (6 and 7) state that a blood donation point is assigned to a temporary or permanent center if it is located within their coverage radius. Eq. (8) ensures that the total blood received from donation points is less than the maximum donation capacity of that blood in that area. Equations (9 and 10) ensure that the blood received from donors should not exceed the blood receiving capacity of the temporary or permanent centers. Equations (11 and 12) show that donors must be assigned to that collection center to receive blood. Eq. (13) states that the amount of blood donated in temporary blood centers is immediately transferred to permanent blood centers. Eq. (14) states that for blood to be transferred from a temporary center to a permanent center, that temporary center must be a subsidiary of that permanent center. Equations (15 to 17) show the amount of blood stock with different ages in the permanent center. It is worth noting that given that the blood units received on the same day are tested for various tests, therefore, considering Constraint (16) in a later period, it is calculated as one-day blood in the blood bank stock of permanent blood storage centers. Eq. (18) states that blood is sent from the permanent center to a regional hospital when that regional hospital can request blood from the permanent blood center and that center is located in the specific province of that hospital. Equations (19 to 21) show the amount of blood stock with different ages in regional hospitals. Relations (22 to 24) state that in order to meet the need for fresh blood in regional hospitals, blood should be used that is compatible with the recipient blood group and has a maximum T_f period of life. Relations (25 and 26) state that while meeting the demand for blood in a regional hospital, attention should be paid to the compatibility of blood groups. Relation (27) guarantees that each field hospital is assigned to exactly one regional hospital. Relation (28) guarantees that blood is transferred from a regional hospital to a field hospital when that field hospital is assigned to that regional hospital. Relations (29 to 31) show the availability of blood of different ages in a field hospital. Relations (32 to 34) show that in order to meet the need for fresh blood in field hospitals, blood should be used that is compatible with the blood groups and has a maximum T_f periods of time. Relations (35 and 36) show that while blood is compatible, the demand of field hospitals must be met. Relations (37 to 41) state that blood can only flow between different points if a connection is formed between nodes. Relations (42 to 44) show the number of vehicles required to move blood between different nodes. Relations (45) ensures that only vehicles capable of traveling that route are used between regional hospitals and field hospitals. Relations (46 to 48) also show that the blood stock level in each of the permanent centers, temporary hospitals, and field hospitals does not exceed the capacity of those centers. Relations (49 to 51) also show the status of the variables of the problem.

4) solution method

The proposed model is solved in small dimensions using the weighted average method and GAMS, and in large dimensions using two algorithms NSGA-II and MOICA algorithms and 10 different size problems. To adjust the parameters the SN ratio of the Taguchi method is used. Furthermore, to compare the algorithms, 5 indicators are used: Number of non-dominated Pareto solutions (NOS), Quality Metric (QM) (percentage of solutions without dominance), Mean Ideal Distance (MID), Diversity Measures (DM) and computational time. The results of comparisons are given in Figures 1 to 5. Figures 1 and 2 show that in most cases the NSGA-II algorithm index performed better than the MOICA algorithm in terms of the number of Pareto solution points and also the QM rate. Figures 3 and 4 also show that the CPU times and MID indices in NSGA-II are better than MOICA, but in terms of the DM index (Figure 5), the MOICA algorithm is better than the NSGA-II algorithm. Finally, according to the results of these comparisons, it can be seen that in most cases the NSGA-II algorithm has better results.

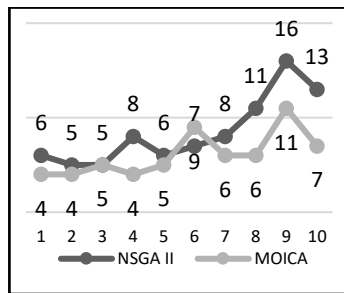


Fig. 1. Comparing using NOS

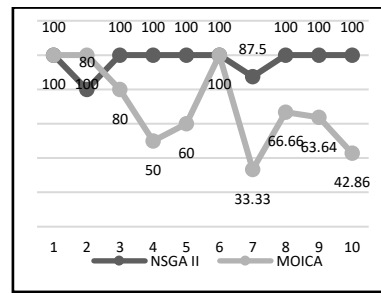


Fig. 2. Comparing using QM

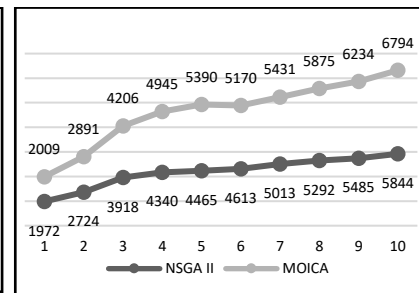


Fig. 3. Comparing using CPU time

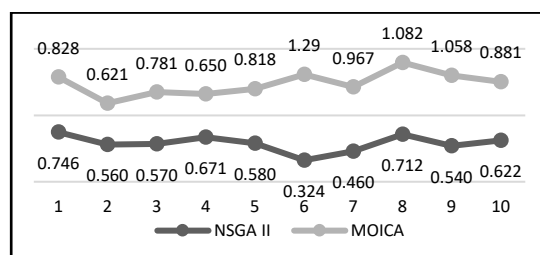


Fig. 6. Comparing using MID

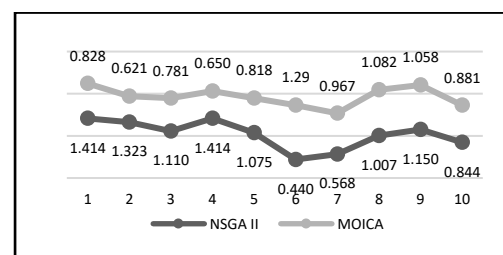


Fig. 5. Comparing using DM

5) conclusion

In this study, the design of the blood supply chain network for post-crisis conditions was addressed, considering reliability, use of the national blood supply network, compatibility of blood groups, and incentive policy, which is a very critical and complex issue. In this context, a mathematical model was developed and the NSGA-II and MOICA algorithms were used to solve large-scale problems. The results of various indicators showed that the NSGA-II algorithm often performs better than the MOICA algorithm in these problems. For future research, it is also recommended to pay attention to blood products such as plasma, platelets, and the use of queuing systems in donation and service.

REFERENCES

- Asadpour, M., Boyer, O., & Tavakkoli-Moghaddam, R. A Blood Supply Chain Network with Backup Facilities Considering Blood Groups and Expiration Date: A Real-world Application. *International Journal of Engineering*, 34(2): 470-479 (2021), [doi: 10.5829/ije.2021.34.02b.19](https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.02b.19)
- Fahmihassan, A., Moghari, M., & Ebadati, O. (2020). Prediction of Blood Donations Using Data Mining Based on the Decision Tree Algorithms KNN, SVM, and MLP. *Engineering Management and Soft Computing*, 6(1): 109-129 (2020), [doi: 10.22091/jemsc.2018.1278](https://doi.org/10.22091/jemsc.2018.1278)
- Hosseini-Motlagh, S.M., Samani, M.R.G. & Homaei, S. Blood supply chain management: robust optimization, disruption risk, and blood group compatibility (a real-life case). *J Ambient Intell Human Comput* 11: 1085–1104 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01315-0>.
- Khalilpourazari, S., Soltanzadeh, S., Weber, G.W. et al. Designing an efficient blood supply chain network in crisis: neural learning, optimization and case study. *Ann Oper Res* 289: 123–152 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03437-2>

طراحی شبکه زنجیره تامین خون با توجه به شبکه ملی خون رسانی، قابلیت اطمینان و اولویت بندی استفاده از گروه های خونی سازگار به کمک NSGA-II و MOICA

امیرحسین دولتیاری^۱ و پروانه سموئی^۲ 

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: a.dolatvari@eng.basu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: p.samouei@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰	بلایا به ویژه زلزله، عواقب نامطلوبی همچون تخریب، ازدست دادن جان انسان ها و تضعیف اثربخشی خدمات بهداشتی را به همراه دارد و یک چالش قابل توجه پس از زلزله ویرانگر، نحوه تهیه خون برای افراد آسیب دیده است. هدف این پژوهش، مدل سازی چندهدفه ریاضی و ارائه الگوریتم هایی جهت طراحی شبکه زنجیره تامین خون بین مراکز جمع آوری موقت، مراکز جمع آوری دائم، بیمارستان های منطقه ای و صحرایی به منظور کاهش هزینه ها با توجه به قابلیت اطمینان حمل، خرابی جاده، نوسانات دمایی، استانداردهای بسته بندی، تجهیزات آزمایشگاهی است. علاوه بر این، استفاده از شبکه ملی خون رسانی، سازگاری گروه های خونی و سیاست تشویق برای شرایط پس از بحران منظور شده است. در این مدل میزان خون جمع آوری شده از اهداکنندگان، تعداد و مکان مراکز جمع آوری خون، میزان خون در هر مرکز و بیمارستان لحاظ می شود. همچنین جهت عدم اتلاف زمان و نجات جان افراد آسیب دیده به ویژه در ساعات اولیه بحران، انتقال خون به مراکز سانحه دیده هم از طریق آمبولانس و هم از طریق هلیکوپتر برنامه ریزی شده است. برای ارزیابی مدل در ابعاد کوچک، مسئله با نرم افزار GAMS و حل کننده CPLEX حل شده است و تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای اصلی مسئله انجام گردیده است. برای حل مسئله در ابعاد بزرگ، از الگوریتم های فراابتکاری NSGA-II و MOICA و برای تنظیم پارامترها، از روش تاگوچی استفاده شده است. مقایسه پنج شاخص ارزیابی نشان می دهد، بطور معمول الگوریتم NSGA-II نسبت به الگوریتم MOICA نتایج بهتری دارد.
کلیدواژه ها: اولویت بندی، تشویق در زنجیره تامین خون، سازگاری گروه های خونی، شبکه ملی خون رسانی، قابلیت اطمینان.	

استناد: دولتیاری، امیرحسین و همکاران. (۱۴۰۴). «طراحی شبکه زنجیره تامین خون با توجه به شبکه ملی خون رسانی، قابلیت اطمینان و اولویت بندی استفاده از گروه های خونی سازگار به کمک NSGA-II و MOICA». مدیریت مهندسی و رایانش نرم، دوره ۱۱ (۲). صص: ۱۷۷-۱۴۲.

<https://doi.org/10.22091/jemsc.2025.12368.1258>



© دولتیاری و سموئی (۱۴۰۴).

ناشر: دانشگاه قم

(۱) مقدمه

در مواقع بحرانی، نیاز به خون به عنوان یکی از عوامل حیاتی انسان افزایش یافته و زنجیره تامین آن، اهمیت بسیاری پیدا می کند تا جمع آوری، فرآوری، نگهداری و توزیع خون و فرآورده های آن در زمان و مکان مناسب صورت گیرد. عواملی مانند تعدیل تقاضا، عرضه، کیفیت، توزیع متعادل و نگهداری خون در شرایط بحرانی، از جمله چالش هایی هستند که ممکن است زنجیره با آن مواجه شود.

طراحی یک شبکه زنجیره تامین خون برای شرایط بحران، باتوجه به قابلیت اطمینان، استفاده از شبکه ملی خون رسانی، سازگاری گروه های خونی و سیاست تشویق، یک مسئله حیاتی و پیچیده است. سیاست های تشویقی نظیر ترویج و نقش اهدا خون در سلامتی و یا ایجاد انگیزه های مالی می تواند به جلب و حفظ اهداکنندگان خون کمک کند. علاوه بر این، در اهدای خون باید به سن یا عمر خون هم توجه کرد زیرا برخی بیماران نیاز دارند از خون تازه (خونی که نهایتاً ۱۰ روز از اهدا آن می گذرد) استفاده کنند اما برای برخی بیماران، این محدودیت وجود ندارد و می توانند از خون عادی که نهایتاً تا ۳۲ روز از زمان اهدا آن گذشته است، استفاده کنند. علاوه بر این، وجود بسیاری از عوامل مانند تغییرات آب و هوا، تعطیلات و حوادث، موجودی مراکز اهدای خون را کاهش می دهند. در این راستا، سازمان ملی انتقال خون ایران، با ایجاد شبکه ملی انتقال خون، استان هایی را معین قرار داده تا هیچ استانی در کشور با کمبود خون مواجه نشود. لازم به ذکر است این سازمان برای انتخاب استان های معین به وضعیت جغرافیایی، سطوح دسترسی، جمعیت روستاها، تعداد بیماران خاص و غیره توجه می کند. در این زمینه، طراحی مناسب شبکه زنجیره تامین خون در تحقیقات مختلفی وارد شده است. بطور مثال: خلیل پور آذری و همکاران (۲۰۲۰) یک زنجیره تامین خون شش سطحی شامل اهداکنندگان، مراکز جمع آوری خون دائمی و موقت، مراکز خون منطقه ای، مراکز خون محلی، بیمارستان های منطقه ای و بیمارستان های محلی را در نظر گرفتند و به سه هدف حداقل سازی زمان، هزینه حمل و نقل و تقاضای برآورده نشده، پرداختند. آنها مدل خود را برای زلزله سال ۲۰۱۷ در مرز ایران و عراق پیاده سازی کردند. آرانی و همکاران (2021) در یک زنجیره تامین به گروه های خونی و ماندگاری فرآورده های آن توجه کردند. اسوریو و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل تخصیص مکان یابی برای حمایت از تصمیمات استراتژیک طراحی مجدد زنجیره تامین خون با محدودیت های واقعی زمان سفر ارائه کردند.

سیفی شیشوان و همکاران (۲۰۲۳) به طراحی یک شبکه زنجیره تامین کارآمد برای مدیریت توزیع خون در شرایط نامشخص بحران پرداختند. حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰) برنامه ریزی توزیع و تخصیص خون پس از فاجعه را در نظر گرفتند. شبکه پیشنهادی شامل بانک های خون مرکزی و بیمارستانی، مناطق آسیب دیده و پناهگاه های موقت، اضطراری بود. قاسمی و همکاران (۲۰۲۰) یک برنامه ریزی ریاضی چندهدفه مختلط اعداد صحیح تصادفی برای برنامه ریزی توزیع لجستیک و تخلیه در هنگام زلزله پیشنهاد دادند. صالحی و همکاران (۲۰۱۹) یک مدل تصادفی چندمرحله ای استوار برای طراحی شبکه تامین خون با در نظر گرفتن تقاضای احتمالی برای خون و مشتقات آنها از جمله پلاسما و پلاکت ارائه دادند. اقبالی و همکاران (۲۰۲۳) یک مدل ریاضی چندهدفه برای طراحی یک زنجیره تامین خون کارآمد برای شرایط بحرانی با در نظر گرفتن امکانات موقت و اختلالات احتمالی ارائه کردند.

یکی دیگر از موضوعات مورد توجه در تحقیقات، قابلیت اطمینان شبکه زنجیره تامین است. قریشی و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل چندهدفه برای مدیریت زنجیره تامین خون اضطراری با در نظر گرفتن سازگاری خون، مسیریابی و تصمیمات تخصیص مکان پیشنهاد کردند. شبکه زنجیره تامین خون آنها متشکل از اهداکنندگان، مراکز جمع آوری، آزمایشگاه‌ها، مراکز خون و بیمارستان‌ها بود و هدف آنها حداقل سازی کل هزینه، زمان و حداکثر سازی حداقل قابلیت اطمینان مسیرها بود. بهروزی و همکاران (۲۰۲۱) به طراحی شبکه زنجیره تامین خون برای مواقع اضطراری و بالابردن قابلیت اطمینان پرداختند و یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای آن توسعه دادند. قطره سامانی و حسینی مطلق (۲۰۱۹) با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی و تجزیه و تحلیل منطقی خاکستری، به تعیین مکان تسهیلات خونی پرداختند. فضلی خلف و همکاران (۲۰۱۹) یک مدل ریاضی سه هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین خون در شرایط اضطراری پیشنهاد کردند. هدف آنها حداقل سازی کل هزینه‌های زنجیره تامین و زمان حمل و نقل بین تاسیسات و حداکثر سازی قابلیت اطمینان کل آزمایش خون اهداشده در آزمایشگاه‌ها بود. حسینی و همکاران (۲۰۲۳) حداقل سازی هزینه، زمان حمل و نقل، تقاضای برآورده نشده و حداکثر سازی قابلیت اطمینان کل را با در نظر گرفتن هزینه‌های کمبود جایگزینی و سازگاری خون بررسی کردند. یوسفی نژاد عطاری و همکاران (2022) به بهینه سازی مصرف گلبول قرمز خون با استفاده از فرآیند تصمیم گیری مارکوف برای بانک خون پایگاه انتقال خون استان زنجان پرداختند. فرشیدی و همکاران (2022) به طراحی رویت گر عصبی برای تخمین متغیرهای حالت کلاس خاصی از سیستم دینامیکی سرطان خون پرداختند. همچنین فهمی حسن و همکاران (۲۰۲۰) برای پیش بینی اهدای خون از داده کاوی بر پایه الگوریتم‌های درخت تصمیم، KNN، SVM و MLP کمک گرفتند.

سازگاری بین گروه‌های خونی در زنجیره تامین خون، موضوعی است که باید مورد توجه قرار بگیرد. در این راستا، فرخی زاده و همکاران (۲۰۲۱)، یک مدل ریاضی چند دوره‌ای دو منظوره واجد سناریوی چندگانه را با هدف به حداقل رساندن تقاضای خون برآورده نشده و هزینه کل شبکه توسعه دادند. در مدل پیشنهادی، ماتریس سازگاری گروه خونی، میزان شکست امکانات و سطح فوریت بیماران در نظر گرفته شده بود. اسدپور و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل MIP برای پلاسمای پیشنهاد دادند که هزینه‌های استقرار امکانات، حمل و نقل و موجودی را حداقل می نمود. رضوی و همکاران (۲۰۲۰) مدلی برای تخصیص گروه‌های خونی با در نظر گرفتن عمر خون پیشنهاد کردند. آرانی و همکاران (۲۰۱۹) یک شبکه زنجیره تامین خون که در آن اختلال ممکن بود جریان گلبول‌های قرمز را قطع کند، بررسی کردند و یک مدل برنامه ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای آن ارائه کردند. رضایی کلاج و همکاران (۲۰۲۱) در مسیریابی مرتبط با توزیع خون‌هایی با گروه‌های مختلف، اتوبوس و هلیکوپتر را در نظر گرفتند و یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای آن پیشنهاد دادند. ظهیری و پیشوایی (۲۰۱۷) به طراحی یک شبکه زنجیره تامین خون با توجه به سازگاری گروه خونی پرداختند و یک مدل برنامه ریزی ریاضی دوهدفه توسعه دادند که هزینه کل و حداکثر تقاضای برآورده نشده را کاهش می داد.

سن خون و سیاست تشویق نیز از مواردی است که باید در زنجیره تامین خون به آن توجه شود. در این زمینه، نهفتی کهنه و همکاران (2021) یک مدل ریاضی سناریو محور دوهدفه جهت حداقل سازی هزینه‌های سیستم و

حداکثرسازی نرخ عرضه خون ارائه کردند. این مدل با استفاده از مجموعه‌ای از تکنیک‌ها از جمله پوشش پشتیبان، انتقال جانبی، کارت هدیه، ذخیره‌سازی بافر و انتقال خون توسعه یافت. آنها در کار خود از روش آزادسازی لاگرانژ استفاده کردند. حسینی مطلق و همکاران (2020) در مطالعه‌ای فسادپذیری خون، قابلیت جایگزینی گروه‌های خونی و ویژگی‌های خون را براساس سن آن در نظر گرفتند.

حمل و نقل خون نیز از مواردی است که باید در زنجیره تامین خون به آن دقت کرد. در این راستا، رشیدزاده و همکاران (2021) در مطالعه‌ای درجه دستیابی به پایداری در تحویل خون را براساس مکان‌یابی مراکز توزیع و تخصیص پهباده‌ها نشان دادند. پورآذری و ارشدی‌خمسه (2019) نیز یک مدل ریاضی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین خون کارآمد و موثر در زلزله پیشنهاد دادند. آنها دو وسیله حمل و نقل مختلف با سرعت و ظرفیت متفاوت برای انتقال خون از مراکز خون‌گیری به مراکز خون استفاده کردند. خلاصه‌ای از تحقیقات مرتبط با این پژوهش در جدول 1 آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد موضوع مکان‌یابی و همچنین سازگاری گروه‌های خونی، از چالش‌های مهمی بوده است که در مقالات این حوزه بررسی شده است. اما با این حال، اگرچه در شرایط بحران ممکن است جاده‌ها، امکانات و غیره در دسترس نباشند و اطمینان از خدمات مناسب کاهش یابد اما تعداد کمی از مقالات به قابلیت اطمینان پرداخته‌اند. علاوه بر این، تعداد اهداف در این جدول نشان می‌دهد که محققین در اکثر موارد بیش از یک هدف را دنبال نموده‌اند. همچنین الگوریتم‌های فراابتکاری و همچنین GAMS، روش‌های رایجی برای حل این دسته از مسائل هستند.

جدول ۱. جزئیات مقالات نزدیک به پژوهش حاضر

نویسنده و سال	بحران	قابلیت اطمینان	حمل و نقل	سازگاری خون	سیاست تشویق	سن خون	مکان‌یابی مراکز	شبکه ملی خون‌رسانی	تعداد اهداف	روش حل
حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰)	✓			✓		✓			۲	برنامه‌نویسی سازشی
فرخی‌زاده و همکاران (۲۰۲۱)	✓			✓			✓		۲	اپسیلون محدودیت تعمیم یافته و آزادسازی لاگرانژ
اسدپور و همکاران (۲۰۲۰)				✓			✓		۱	GAMS
سیفی‌شیشوان و همکاران (۲۰۲۱)	✓			✓					۱	GAMS
رضوی و همکاران (۲۰۲۱)				✓			✓		۳	GAMS و یک الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

الگوریتم‌های MOPSO و NSGAI	۳	✓			مسلمی و پسندیده (۲۰۲۱)
بسته حل‌کننده IBM ILOG MILP	۲		✓		آرانی و همکاران (۲۰۱۹)
بهینه‌ساز گرگ خاکستری چندهدفه، ازدحام ذرات چندهدفه و ژنتیک چندهدفه.	۳	✓		✓	قریشی و همکاران (۲۰۲۰)
بهینه‌سازی استوار و روش TH	۲	✓	✓	✓	حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰)
FR و NSGA-III NSGA-II	۶		✓	✓	بهریزی و همکاران (۲۰۲۱)
محدودیت ε	۳		✓		ارانی و همکاران (۲۰۲۱)
برنامه‌ریزی هدف فازی پیشگیرانه	۳			✓	رشیدزاده و همکاران (۲۰۲۱)
آزادسازی لاگرانژ	۲		✓	✓	نهفتی کهنه و همکاران (۲۰۲۱)
رویکرد محدودیت اپسیلون و NSGA-II	۳	✓			قاسمی و همکاران (۲۰۲۰)
GAMS	۱	✓	✓		حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰)
ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و تجزیه و تحلیل منطقی خاکستری.	۱	✓		✓	قطره‌سامانی و حسینی مطلق (۲۰۱۹)

صالحی و همکاران (۲۰۱۹)	✓	✓	۱	GAMS
فضلی‌خلف و همکاران (۲۰۱۹)	✓	✓	۳	برنامه‌نویسی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر احتمالی قوی
رضایی کلاج و همکاران (۲۰۲۱)	✓	✓	۲	CPLEX
خلیل‌پورآذری و ارشدی‌خمسه (۲۰۱۹)	✓	✓	۲	تصمیم‌گیری چندهدفه و چیشف وزن‌دار و حل در GAMS
خلیل‌پورآذری و همکاران (۲۰۲۰)	✓	✓	۳	روش چیشف موزون
یانگ و همکاران (۲۰۲۴)	✓	✓	۱	آزادسازی لاگرانژ و الگوریتم‌های ترکیبی
نمازیان و بابازاده (۲۰۲۵)	✓	✓	۱	روش‌های بهینه‌سازی
حسینی و همکاران (۲۰۲۳)	✓	✓	۴	الگوریتم NSGA-II
مطالعه حاضر	✓	✓	۳	GAMS و دو الگوریتم فراابتکاری-NSGA-II و MOICA

قابلیت اطمینان زنجیره تامین خون به‌ویژه در شرایط بحران اهمیت بالایی دارد. علاوه بر این، سازگاری گروه‌های خونی موضوعی است که می‌تواند مسئله را به دنیای واقعی نزدیک‌تر سازد. همچنین استفاده از وسایل نقلیه مختلف و نحوه جابه‌جایی خون می‌تواند در سرعت زنجیره تامین اثرگذار باشد. همچنین تشویق به اهدا و سن یا عمر خون موضوعات بسیار تاثیرگذاری در تامین خون هستند. اما تاکنون مطالعه‌ای که قابلیت اطمینان، در نظر گرفتن شبکه ملی خون‌رسانی، تشویق اهداکنندگان، اولویت، سن و سازگاری گروه‌های خونی و نیز توجه به برخی بیماری‌ها که باید حتماً از خون تازه استفاده کنند، در زنجیره تامین خون به‌صورت همزمان در نظر گرفته نشده است. در این تحقیق سعی می‌شود به آن پرداخته شود.

همچنین علاوه بر توسعه یک مدل ریاضی جدید چندهدفه، دو الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و MOICA برای ابعاد بزرگ و همچنین حل با GAMS برای ابعاد کوچک پیشنهاد می‌شود. دلیل استفاده از الگوریتم NSGA-II نتایج خوبی بوده است که این الگوریتم در حل مسائل مشابه داشته است که جدول ۱ موید این موضوع است. علاوه بر این، تحقیقات ما نشان می‌داد که الگوریتم MOICA که جزء الگوریتم‌های چندهدفه‌ای است، تاکنون برای این دسته از مسائل استفاده نشده است. لذا در این مقاله به مقایسه این دو الگوریتم نیز پرداخته می‌شود.

۲) تعریف مسئله

یکی از مسائل حیاتی در سیستم‌های بهداشت و درمان، تامین خون کافی، باکیفیت و دارای وضعیت مناسب در شرایط بحرانی است. در صورت وقوع فاجعه‌ها و حوادث، نیاز به خون افزایش یافته و درعین حال، عدم تامین کافی خون می‌تواند به مشکلات جدی در درمان بیماران منجر شود. به همین دلیل، طراحی یک شبکه زنجیره تامین خون کارآمد و قابل اطمینان در شرایط بحرانی، امری بااهمیت است.

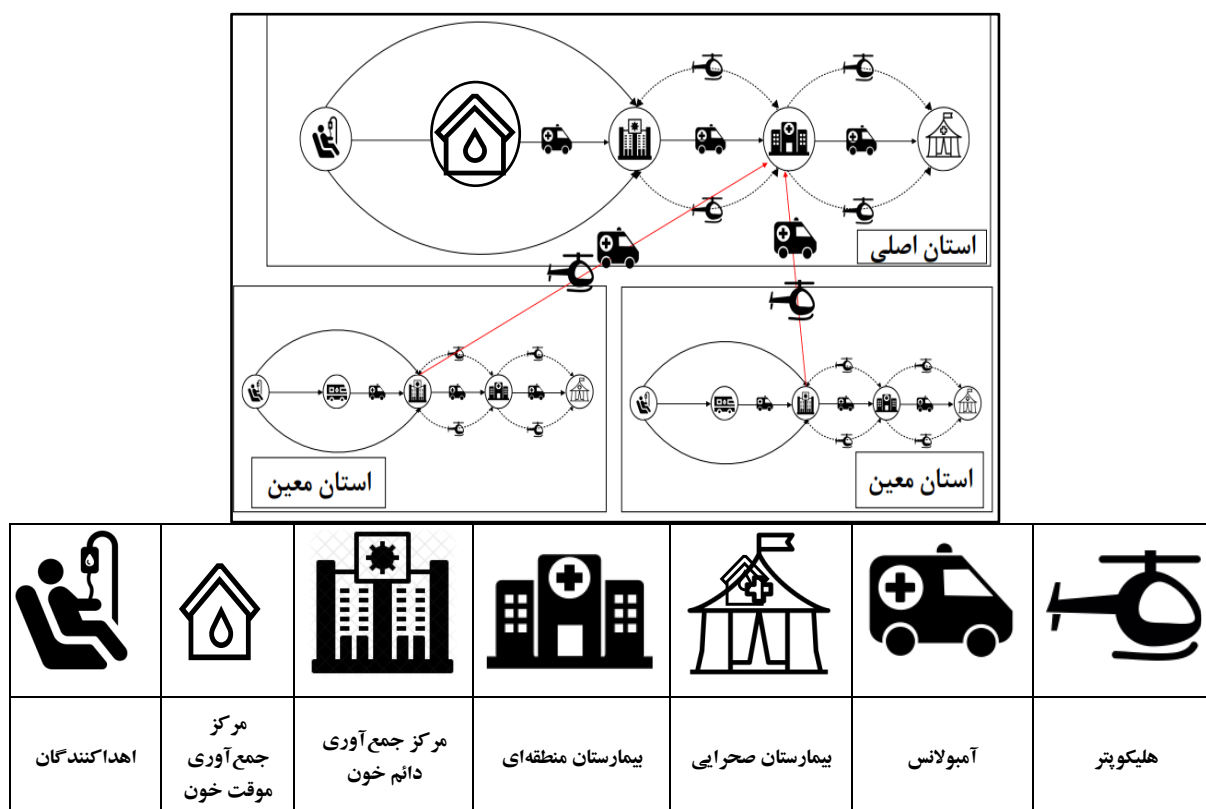
هدف اصلی این مسئله، طراحی یک شبکه زنجیره تامین خون است که بتواند در شرایط بحرانی و پس از وقوع فاجعه، به میزان کافی خون تامین کند. همچنین این شبکه باید قابلیت اطمینان بالایی داشته باشد و بتواند با مدیریت مناسب منابع و توزیع خون، درخواست‌های بیمارستان‌ها و مراکز درمانی را پاسخگو باشد. همچنین در طراحی این شبکه باید به سازگاری گروه‌های خونی و اجرای سیاست‌های تشویق به اهدای خون، توجه ویژه‌ای داشت. لذا می‌توان سیستمی طراحی کرد که با بهره‌گیری از مدیریت منابع بهینه و بهبود استفاده از شبکه ملی خون‌رسانی ایران، تامین خون در شرایط بحران را بهبود داد. در این پژوهش، یک زنجیره تامین چنددوره‌ای چندسطحی شامل اهداکنندگان، مراکز جمع‌آوری موقت و دائمی خون، بیمارستان‌های منطقه‌ای و صحرایی و استان‌های معین با توجه به سازگاری بین گروه‌های خونی لحاظ شده است. در این راستا، یک مدل ریاضی سه‌هدفه در راستای کاهش هزینه‌های کل شبکه شامل هزینه‌های راه‌اندازی مراکز جمع‌آوری موقت خون، نگهداری واحدهای خونی در مراکز جمع‌آوری دائم خون، بیمارستان‌های منطقه‌ای و صحرایی، هزینه‌های حمل و نقل و تشویق اهداکنندگان خون، بالابردن قابلیت اطمینان و افزایش استفاده از خون‌های مشابه در زنجیره تامین خون است. جهت در نظر گرفتن قابلیت اطمینان به عواملی نظیر شرایط جاده، نگهداری، دما و غیره توجه شده است. در این مدل میزان خون جمع‌آوری شده از اهداکنندگان، تعداد و مکان مراکز جمع‌آوری خون (دائم و موقت)، میزان خون در هر بیمارستان لحاظ می‌شود. برای نزدیک‌تر شدن به مسائل دنیای واقعی اولویت‌دهی و سازگاری برای هر گروه‌های خونی منظور شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است. بطور مثال گروه خونی O+ فقط از گروه خونی O+ و گروه خونی O- می‌تواند خون دریافت کند. یا گروه خونی B- فقط از گروه خونی B- و گروه خونی O- می‌تواند خون دریافت کند. درواقع به دلیل حیاتی بودن برخی گروه‌های خونی و کمیاب بودن آنها مثل گروه خونی O- که فقط و فقط از گروه خونی مثل خودش می‌تواند خون دریافت کند و همچنین می‌تواند به تمام گروه‌های خونی دیگر خون اهدا کند، اولویت‌دهی خون‌رسانی را در این مطالعه مطرح کرده‌ایم و برای هر گروه از اولویت ۱ تا ۸ شماره‌گذاری انجام شده است. بطور مثال گروه خونی A+، اولویت اول باید در صورت وجود از گروه خونی A+ خون دریافت کند، اگر موجودی نبود در اولویت

دوم از گروه خونی A- و باز هم اگر از این گروه خونی موجود نبود، در اولویت سوم از گروه خونی O+ و در نهایت باز هم اگر از این گروه خونی موجود نبود، در اولویت چهارم از گروه خونی O- خون دریافت کند.

جدول ۲. کد، سازگاری و اولویت‌های خون‌رسانی

کد گروه خونی	گیرنده خون	اهدایکننده خون							
		O-	O+	A-	A+	B-	B+	AB-	AB+
1	O-	1							
2	O+	2	1						
3	A-	2		1					
4	A+	4	3	2	1				
5	B-	2				1			
6	B+	4	3			2	1		
7	AB-	4		2		3		1	
8	AB+	8	7	5	3	6	4	2	1

سازمان انتقال خون به کمک شبکه ملی، استان‌هایی را معین استان‌های دیگر قرار داده تا هیچ مرکز انتقال خونی در کل کشور با کمبود خون مواجه نشود. همچنین سیاستی برای تشویق به اهدا خون در شرایط بحران، در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر به دلیل عدم اتلاف زمان و نجات جان افراد آسیب‌دیده به‌ویژه در ساعات اولیه بحران، برنامه‌ریزی انتقال خون به مراکز جمع‌آوری دائم و بیمارستان‌ها هم از طریق آمبولانس و هم از طریق هلیکوپتر انجام شده است. نکته دیگری که در این مسئله در نظر گرفته شده است، این است که علاوه بر حداکثر طول عمر خون، به تازه‌بودن و عادی‌بودن آن نیز توجه شده است. شکل 1 زنجیره مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمای کلی زنجیره تامین خون

(۳) روش تحقیق

در این قسمت به شرح مدل ریاضی و روش‌های حل استفاده‌شده، پرداخته می‌شود.

(۳-۱) مدل ریاضی پیشنهادی

پیش از آنکه مدل ریاضی مسئله بیان گردد، لازم است مفروضات و اجزای مدل ریاضی آن به شرح زیر بیان شود:

(۳-۱-۱) مفروضات مدل

- اهداکنندگان خود به مراکز جمع‌آوری موقت یا دائم خون مراجعه می‌کنند و از این بابت هزینه‌ای برای انتقال اهداکنندگان به این مراکز وجود ندارد.
- بین مراکز جمع‌آوری موقت و دائم خون، انتقال خون از طریق آمبولانس خواهد بود.
- در مراکز جمع‌آوری موقت، ذخیره‌سازی خون صورت نمی‌گیرد و هرآنچه در این مراکز دریافت می‌شود، همان مقدار نیز ارسال می‌شود اما در مراکز جمع‌آوری دائم، بیمارستان منطقه‌ای و بیمارستان صحرایی، خون نگهداری می‌شود.
- فقط از استان معین به بیمارستان منطقه‌ای، انتقال خون وجود دارد.
- هزینه‌ها و فواصل انتقال خون بین بخش‌های مختلف قطعی است.
- سن خون و تازگی و یا عادی‌بودن خون مدنظر قرار دارد.

۳-۱-۲) اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم

در این قسمت، به ارائه اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود.

• **اندیس‌ها**

$i = 1, 2, 3, \dots, I$ کلیه نقاط اهدای خون

$j = 1, 2, 3, \dots, J$ مراکز بالقوه جمع‌آوری موقت خون

$k = 1, 2, 3, \dots, K$ مراکز جمع‌آوری دائم خون

$m = 1, 2, 3, \dots, M$ بیمارستان‌های منطقه‌ای

$n = 1, 2, 3, \dots, N$ بیمارستان‌های صحرایی

$t = 1, 2, 3, \dots, T$ دوره‌های زمانی

$v = 1, 2, 3, \dots, V$ وسایل حمل و نقل

$e, e' = 1, 2, 3, \dots, E$ گروه‌های خون

$a = 1, 2, 3, \dots, A$ سن خون مجاز

• **پارامترها**

Tf حداکثر طول عمر خون که به‌ازای آن خون تازه شمرده می‌شود.

R حداکثر شعاع پوششی که مراجعین می‌توانند جهت اهدای خون به آن مراکز جمع‌آوری، مراجعه نمایند.

$CapV_v$ ظرفیت حمل خون توسط وسیله‌نقلیه v ام

$CapJ_j$ ظرفیت دریافت خون در مرکز جمع‌آوری موقت j

$CapK_k$ ظرفیت دریافت خون در مرکز جمع‌آوری دائم k

$GD_{e,e'}$ جدول سازگاری مابین گروه‌های خونی مختلف e (اهدایکننده) و e' (دریافت‌کننده)

Sup_{ie} حداکثر مقدار گروه خونی نوع e که توسط نقطه اهدای خون i ام می‌تواند اهدا گردد.

XJK_{jk} برابر ۱ است اگر مرکز جمع‌آوری موقت j ام قادر به ارسال خون به مرکز جمع‌آوری دائم k ام باشد، در غیر این صورت برابر ۰ است.

XKM_{km}	برابر ۱ است اگر مرکز جمع آوری خون دائم k قادر به ارسال خون به بیمارستان منطقه‌ای m باشد، در غیر این صورت برابر ۰ است.
$DisIJ_{ij}$	فاصله بین نقطه اهدای خون i با مرکز جمع آوری خون موقت j
$DisIK_{ik}$	فاصله بین نقطه اهدای خون i با مرکز جمع آوری خون دائم k
DMF_{met}	مقدار تقاضای گروه خونی تازه نوع e در بیمارستان منطقه‌ای m در دوره t ام.
DMN_{met}	مقدار تقاضای گروه خونی تازه یا عادی نوع e در بیمارستان منطقه‌ای m در دوره t ام.
DNF_{net}	مقدار تقاضای گروه خونی تازه نوع e در بیمارستان صحرایی m در دوره t ام.
DNN_{net}	مقدار تقاضای گروه خونی تازه یا عادی نوع e در بیمارستان صحرایی m در دوره t ام.
$InvKO_{kae}$	مقدار موجودی گروه خونی نوع e با طول عمر a دوره مرکز جمع آوری خون دائم k ام
$InvMO_{mae}$	مقدار موجودی گروه خونی نوع e با طول عمر a دوره بیمارستان منطقه‌ای m ام
$InvNO_{nae}$	مقدار موجودی گروه خونی نوع e با طول عمر a دوره بیمارستان صحرایی m ام
BIJ_{ij}	متوسط قابلیت اطمینان بر حسب شرایط جاده، نگهداری و ایمنی حمل بین نقطه اهدای i و مرکز جمع آوری خون موقت j
BIK_{ik}	متوسط قابلیت اطمینان بر حسب شرایط جاده، نگهداری و ایمنی حمل خون بین نقطه اهدای خون i و مرکز جمع آوری خون دائم k
BJK_{jk}	متوسط قابلیت اطمینان بر حسب شرایط جاده، نگهداری و ایمنی حمل خون بین مرکز جمع آوری خون موقت j و مرکز جمع آوری خون دائم k
BKM_{km}	متوسط قابلیت اطمینان بر حسب شرایط جاده، نگهداری و ایمنی حمل خون بین مرکز جمع آوری خون دائم k و بیمارستان منطقه‌ای m
BMN_{mn}	متوسط قابلیت اطمینان بر حسب شرایط جاده، نگهداری و ایمنی حمل خون بین بیمارستان منطقه‌ای m با بیمارستان صحرایی n
CJK_{jkv}	هزینه ثابت جابه‌جایی استفاده از وسیله نقلیه v مابین مرکز جمع آوری خون موقت j و مرکز جمع آوری خون دائم k
CKM_{kmv}	هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه v بین مرکز جمع آوری خون دائم k و بیمارستان منطقه‌ای m
CMN_{mnv}	هزینه جابه‌جایی وسیله نقلیه v مابین بیمارستان منطقه‌ای m و بیمارستان صحرایی n
RMN_{mnv}	برابر ۱ اگر وسیله نقلیه v بتواند مسیر مابین بیمارستان منطقه‌ای m و بیمارستان صحرایی n را طی کند، در غیر این صورت برابر صفر است.

Co_{ie}	پاداشی که می‌بایست به منظور تشویق اهداکنندگان گروه خونی نوع e بابت هر واحد خون دریافتی، در منطقه i ام پرداخت گردد.
CJ_j	هزینه استقرار مرکز جمع‌آوری خون موقت j ام
HK_k	هزینه نگهداری هر واحد خونی در مرکز جمع‌آوری خون دائم k
HM_m	هزینه نگهداری هر واحد خونی در بیمارستان منطقه‌ای m
HN_n	هزینه نگهداری هر واحد خونی در بیمارستان صحرایی n
BK_k	حداکثر واحد خونی که می‌توان در مرکز جمع‌آوری خون دائم k ام در هر دوره نگهداری نمود.
BM_m	حداکثر واحد خونی که می‌توان در بیمارستان منطقه‌ای m ام در هر دوره نگهداری نمود.
BN_n	حداکثر واحد خونی که می‌توان در بیمارستان صحرایی n ام در هر دوره نگهداری نمود.
Pri_e'	جریمه استفاده از خون‌های سازگار اما نایاب‌تر براساس اولویت خونی
M	یک عدد مثبت خیلی بزرگ

• متغیرهای تصمیم

SIJ_{ijet}	مقدار جریان خون تازه انتقال یافته نوع e در دوره t بین نقطه اهدای خون i و مرکز جمع‌آوری خون موقت j
SIK_{iket}	مقدار جریان خون تازه انتقال یافته نوع e در دوره t بین نقطه اهدای خون i و مرکز جمع‌آوری خون دائم k
SJK_{jket}	مقدار جریان خون تازه انتقال یافته نوع e در دوره t بین مرکز جمع‌آوری خون موقت j و مرکز جمع‌آوری خون دائم k
SKM_{kmaet}	مقدار جریان خون نوع e با عمر a انتقال یافته بین مرکز جمع‌آوری خون دائم k و بیمارستان منطقه‌ای m در دوره t
SMN_{mnaet}	مقدار جریان خون نوع e با عمر a انتقال یافته بین بیمارستان منطقه‌ای m و بیمارستان صحرایی n در دوره t
$InvK_{kaet}$	مقدار موجودی خون نوع e با عمر a در دوره t در مرکز جمع‌آوری خون دائم k
$InvM_{maet}$	مقدار موجودی خون نوع e با عمر a در دوره t در بیمارستان منطقه‌ای m
$InvN_{naet}$	مقدار موجودی خون نوع e با عمر a در دوره t در بیمارستان صحرایی n
$OMF_{maee't}$	مقدار خون تازه نوع e' با طول عمر a که جهت پاسخگویی به تقاضای گروه خونی نوع e در دوره t و در بیمارستان منطقه‌ای m استفاده می‌شود.

- $OMN_{maee't}$ مقدار خون تازه یا عادی نوع e' با طول عمر a که جهت پاسخگویی به تقاضای گروه خونی نوع e در دوره t و در بیمارستان منطقه‌ای m استفاده می‌شود.
- $ONF_{nae'et}$ مقدار خون تازه نوع e' با طول عمر a که جهت پاسخگویی به تقاضای گروه خونی نوع e در دوره t و در بیمارستان صحرایی n استفاده می‌شود.
- $ONN_{nae'et}$ مقدار خون تازه یا عادی نوع e' با طول عمر a که جهت پاسخگویی به تقاضای گروه خونی نوع e در دوره t و در بیمارستان صحرایی n استفاده می‌شود.
- X_{mn} برابر ۱ است اگر قرار باشد که بیمارستان صحرایی n ام توسط بیمارستان منطقه‌ای m ام خون‌رسانی گردد، در غیر این صورت برابر صفر است.
- XJ_j برابر ۱ اگر مرکز جمع‌آوری خون موقت j ام احداث گردد، در غیر این صورت برابر صفر است.
- YJ_{ij} برابر ۱ اگر قرار اهداکنندگان خون منطقه i به مرکز جمع‌آوری خون موقت j تخصیص یابند، در غیر این صورت برابر صفر است.
- YK_{ik} برابر ۱ اگر اهداکنندگان خون منطقه i به مرکز جمع‌آوری خون دائم k تخصیص یابند، در غیر این صورت برابر صفر است.
- YIJ_{ijt} برابر ۱ اگر نقطه اهدای خون i به مرکز جمع‌آوری خون موقت j در دوره t تخصیص یابد، در غیر این صورت برابر صفر است.
- YIK_{ikt} برابر ۱ اگر نقطه اهدای خون i به مرکز جمع‌آوری خون دائم k در دوره t تخصیص یابد، در غیر این صورت برابر صفر است.
- YJK_{jkt} برابر ۱ اگر مرکز جمع‌آوری خون موقت j به مرکز جمع‌آوری خون دائم k در دوره t تخصیص یابد، در غیر این صورت برابر صفر است.
- YKM_{kmt} برابر ۱ اگر مرکز جمع‌آوری خون دائم k به بیمارستان منطقه‌ای m در دوره t تخصیص یابد، در غیر این صورت برابر صفر است.
- YMN_{mnt} برابر ۱ اگر بیمارستان منطقه‌ای m به بیمارستان صحرایی n در دوره t تخصیص یابد، در غیر این صورت برابر صفر است.
- NJK_{jkvt} تعداد وسایل حمل‌ونقل v ام که در دوره t ام به منظور حمل‌ونقل خون بین مرکز جمع‌آوری خون موقت j ام و مرکز جمع‌آوری خون دائم k ام مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- NKM_{kmvt} تعداد وسایل حمل‌ونقل نوع v که در دوره t به منظور حمل‌ونقل خون مابین مرکز جمع‌آوری خون دائم k و بیمارستان منطقه‌ای m استفاده می‌شود.
- NMN_{mnvt} تعداد وسایل حمل‌ونقل نوع v که در دوره t به منظور حمل‌ونقل خون بین بیمارستان منطقه‌ای m و بیمارستان صحرایی n استفاده می‌شود.

۳-۱-۳ مدل ریاضی

قبل از ارائه مدل پیشنهادی، لازم است که مقایسه‌ای بین مطالعه حاضر و مقالات پایه صورت گیرد. مقالات پایه مورد استفاده در این مطالعه شامل: (۱) مقاله پورآذری و همکاران (۲۰۲۰) که بحران، وسایل نقلیه متفاوت و مکان‌یابی مراکز را در نظر گرفته‌اند، (۲) مقاله حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰) که بحران، سازگاری، اولویت خون‌دهی و سن خون تازه و عادی در نظر گرفته شده است. اما هیچ‌یک از مطالعات اشاره شده تمام موارد بحران، قابلیت اطمینان، وسایل نقلیه متفاوت، سازگاری گروه‌های خونی، اولویت خون‌دهی، شبکه ملی خون‌رسانی، سیاست تشویق، سن خون، خون تازه و عادی و مکان‌یابی مراکز را به صورت یکجا باهم در نظر نگرفته بودند. در ادامه هریک از توابع هدف و محدودیت‌ها توضیح داده می‌شوند.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 = & \sum_j C J_j * X J_j + \sum_k \sum_a \sum_e \sum_t H K_k * \text{Inv} K_{kaet} + \sum_m \sum_a \sum_e \sum_t H M_m * \text{Inv} M_{maet} \\ & + \sum_n \sum_a \sum_e \sum_t H N_n * \text{Inv} N_{naet} + \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t C J K_{jkv} * N J K_{jkvt} \\ & + \sum_k \sum_m \sum_v \sum_t C K M_{kmv} * N K M_{kmvt} + \sum_m \sum_n \sum_v \sum_t C M N_{mnv} * N M N_{mnvt} \\ & + \sum_i \sum_j \sum_e \sum_t C o_{ie} * S I J_{ijet} + \sum_i \sum_k \sum_e \sum_t C o_{ie} * S I K_{iket} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Max } Z_2 = & \sum_i \sum_j \sum_t B I J_{ij} * Y I J_{ijt} + \sum_i \sum_k \sum_t B I K_{ik} * Y I K_{ikt} + \sum_j \sum_k \sum_t B J K_{jk} * Y J K_{jkt} \\ & + \sum_k \sum_m \sum_t B K M_{km} * Y K M_{kmt} + \sum_m \sum_n \sum_t B M N_{mn} * Y M N_{mnt} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_3 = & \sum_m \sum_a \sum_e \sum_{e'} \sum_t P r i_{e'} * (O M F_{maee't} + O M N_{maee't}) \\ & + \sum_n \sum_a \sum_e \sum_{e'} \sum_t P r i_{e'} * (O N F_{naee't} + O N N_{naee't}) \end{aligned} \quad (3)$$

S.to:

$$\sum_j Y J_{ij} + \sum_k Y K_{ik} \leq 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_i Y J_{ij} \leq M * X J_j \quad \forall j \quad (5)$$

$$D i s I J_{ij} * Y J_{ij} \leq R \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$D i s I K_{ik} * Y K_{ik} \leq R \quad \forall i, k \quad (7)$$

$$\sum_j \sum_t S I J_{ijet} + \sum_k \sum_t S I K_{iket} \leq S u p_{ie} \quad \forall i, e \quad (8)$$

$$\sum_i \sum_e S I J_{ijet} \leq C a p J_j \quad \forall j, t \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_e S I K_{iket} \leq C a p K_k \quad \forall k, t \quad (10)$$

$$\sum_e \sum_t SIJ_{ijet} \leq M * YJ_{ij} \quad \forall i, j \quad (11)$$

$$\sum_e \sum_t SIK_{iket} \leq M * YK_{ik} \quad \forall i, k \quad (12)$$

$$\sum_i SIJ_{ijet} = \sum_k SJK_{jket} \quad \forall j, e, t \quad (13)$$

$$SJK_{jket} \leq M * XJK_{jk} \quad \forall j, k, e, t \quad (14)$$

$$InvK_{kae(t1)} = InvK0_{kae} - \sum_m SKM_{kmae(t1)} \quad \forall k, a, e \quad (15)$$

$$InvK_{k(a1)et} = \sum_i SIK_{ike(t-1)} + \sum_j SJK_{jke(t-1)} - \sum_m SKM_{km(a1)et} \quad \forall k, e, t | t \geq 2 \quad (16)$$

$$InvK_{kaet} = InvK_{k(a-1)e(t-1)} - \sum_m SKM_{kmaet} \quad \forall k, a | a \geq 2, e, t | t \geq 2 \quad (17)$$

$$SKM_{kmaet} \leq M * XKM_{km} \quad \forall k, m, a, e, t \quad (18)$$

$$InvM_{mae(t1)} = InvM0_{mae} + \sum_k SKM_{kmae(t1)} - \sum_n SMN_{mnae(t1)} - \sum_{e'} OMF_{mae'e(t1)} - \sum_{e'} OMN_{mae'e(t1)} \quad \forall m, a, e \quad (19)$$

$$InvM_{m(a1)et} = \sum_k SKM_{km(a1)et} - \sum_n SMN_{mn(a1)et} - \sum_{e'} OMF_{m(a1)e'et} - \sum_{e'} OMN_{m(a1)e'et} \quad \forall m, e, t | t \geq 2 \quad (20)$$

$$InvM_{maet} = InvM_{m(a-1)e(t-1)} + \sum_k SKM_{kmaet} - \sum_n SMN_{mnaet} - \sum_{e'} OMF_{mae'et} - \sum_{e'} OMN_{mae'et} \quad \forall m, a | a \geq 2, e, t | t \geq 2 \quad (21)$$

$$\sum_{a|a \leq Tf} \sum_{e'} OMF_{maee't} \geq DMF_{met} \quad \forall m, e, t \quad (22)$$

$$OMF_{maee't} \leq M * GD_{ee'} \quad \forall m, a, e, e', t \quad (23)$$

$$OMF_{maee't} = 0 \quad \forall m, a, e, e', t | t > Tf \quad (24)$$

$$\sum_a \sum_{e'} OMN_{maee't} \geq DMN_{met} \quad \forall m, e, t \quad (25)$$

$$OMN_{maee't} \leq M * GD_{ee'} \quad \forall m, a, e, e', t \quad (26)$$

$$\sum_m X_{mn} = 1 \quad \forall n \quad (27)$$

$$\sum_a \sum_e \sum_t SMN_{mnaet} \leq M * X_{mn} \quad \forall m, n \quad (28)$$

$$InvN_{nae(t1)} = InvN_{nae} + \sum_m SMN_{mnae(t1)} - \sum_{e'} ONF_{nae'e(t1)} - \sum_{e'} ONN_{nae'e(t1)} \quad \forall n, a, e \quad (29)$$

$$InvN_{n(a1)et} = \sum_m SMN_{mn(a1)et} - \sum_{e'} ONF_{n(a1)e'et} - \sum_{e'} ONN_{n(a1)e'et} \quad \forall n, e, t | t \geq 2 \quad (30)$$

$$InvN_{naet} = InvN_{n(a-1)e(t-1)} + \sum_m SMN_{mnaet} - \sum_{e'} ONF_{nae'et} - \sum_{e'} ONN_{nae'et} \quad \forall n, a | a \geq 2, e, t | t \geq 2 \quad (31)$$

$$\sum_{a|a \leq Tf} \sum_{e'} ONF_{naee't} \geq DNF_{net} \quad \forall n, e, t \quad (32)$$

$$ONF_{naee't} \leq M * GD_{ee'} \quad \forall n, a, e, e', t \quad (33)$$

$$ONF_{naee't} = 0 \quad \forall n, a, e, e', t | t > Tf \quad (34)$$

$$\sum_a \sum_{e'} ONN_{naee't} \geq DNN_{net} \quad \forall n, e, t \quad (35)$$

$$ONN_{naee't} \leq M * GD_{ee'} \quad \forall n, a, e, e', t \quad (36)$$

$$\sum_e SIJ_{ijet} \geq YIJ_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (37)$$

$$\sum_e SIK_{iket} \geq YIK_{ikt} \quad \forall i, k, t \quad (38)$$

$$\sum_e SJK_{jket} \geq YJK_{jkt} \quad \forall j, k, t \quad (39)$$

$$\sum_a \sum_e SKM_{kmaet} \geq YKM_{kmt} \quad \forall k, m, t \quad (40)$$

$$\sum_a \sum_e SMN_{mnaet} \geq YMN_{mnt} \quad \forall m, n, t \quad (41)$$

$$\sum_e SJK_{jket} \leq CapV_{(v1)} * NJK_{jk(v1)t} \quad \forall j, k, t \quad (42)$$

$$\sum_a \sum_e SKM_{kmaet} \leq \sum_v CapV_v * NKM_{kmvt} \quad \forall k, m, t \quad (43)$$

$$\sum_a \sum_e SMN_{mnaet} \leq \sum_v CapV_v * NMN_{mnvt} \quad \forall m, n, t \quad (44)$$

$$NMN_{mnvt} \leq M * RMN_{mnv} \quad \forall m, n, v, t \quad (45)$$

$$\sum_a \sum_e InvK_{kaet} \leq BK_k \quad \forall k, t \quad (46)$$

$$\sum_a \sum_e InvM_{maet} \leq BM_m \quad \forall m, t \quad (47)$$

$$\sum_a \sum_e InvN_{naet} \leq BN_n \quad \forall n, t \quad (48)$$

$$YMN_{mnt}, YKM_{kmt}, YJK_{jkt}, YIK_{ikt}, YIJ_{ijt}, YK_{ik}, YJ_{ij}, XJ_j, X_{mn} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, n, k, m, t \quad (49)$$

$$SIJ_{ijet}, SIK_{iket}, SJK_{jket}, SKM_{kmaet}, SMN_{mnaet}, InvK_{kaet}, InvM_{maet}, InvN_{naet} \quad \forall i, j, e, a, e', n, k, m, t \quad (50)$$

$$OMF_{maee't}, OMN_{maee't}, ONF_{nae'et}, ONN_{nae'et} \geq 0 \quad (51)$$

$$NJK_{jkt}, NKM_{kmvt}, NMN_{mnvt} \geq 0 \text{ and Integer} \quad \forall j, k, v, t, m, n$$

رابطه (1)، تابع هدف اول مدل می‌باشد که به ترتیب مجموع هزینه‌های راه‌اندازی مراکز جمع‌آوری موقت خون، هزینه‌های نگهداری واحدهای خونی در مراکز جمع‌آوری دائم خونی، بیمارستان‌های منطقه‌ای و موقت، هزینه‌های حمل-ونقل و تشویق اهداکنندگان خون را حداقل می‌نماید. رابطه (2)، متوسط قابلیت اطمینان انتقال خون به مراکز مختلف را حداکثر می‌سازد. در رابطه (3) نیز تلاش می‌شود تا جای ممکن از خون‌هایی استفاده شود که اولویت بیشتری جهت استفاده دارند. رابطه (4)، تضمین می‌کند هر نقطه اهدا، حداکثر به یک مرکز جمع‌آوری خون دائم یا موقت تخصیص یابد. رابطه (5)، بیان می‌کند در صورتی می‌توان به یک مرکز جمع‌آوری موقت خون، خونی اهدا کرد که آن مرکز، احداث شده باشد. روابط (6 و 7) بیان می‌کنند در صورتی یک نقطه اهدای خون به یک مرکز جمع‌آوری خون موقت یا دائم تخصیص می‌یابد که در شعاع پوشش آنها واقع شده باشند. رابطه (8) تضمین می‌کند مجموع خون دریافت‌شده از نقاط اهدا از حداکثر میزان توان اهدای آن خون در آن منطقه بیشتر نگردد. روابط (9 و 10) تضمین می‌کنند که خون دریافتی از اهداکنندگان نباید بیشتر از ظرفیت دریافت خون مراکز جمع‌آوری موقت یا دائم گردد. روابط (11 و 12) نشان می‌دهند برای گرفتن خون، بایستی اهداکنندگان به آن مرکز جمع‌آوری تخصیص یافته باشند. رابطه (13) بیان می‌کند مقدار خونی که در مراکز جمع‌آوری موقت خون اهدا می‌شود، بلافاصله به مراکز دائم خون انتقال می‌یابند. رابطه (14) بیان می‌کند برای انتقال خون از مراکز جمع‌آوری موقت به دائم، باید آن مرکز موقت زیرمجموعه آن مرکز دائم باشد. روابط (15 تا 17) مقدار موجودی خون با عمرهای متفاوت را در مراکز جمع‌آوری دائم نشان می‌دهد. رابطه (18) بیان می‌کند زمانی خون از مراکز جمع‌آوری دائم به بیمارستان منطقه‌ای ارسال می‌شود که آن بیمارستان منطقه‌ای بتواند از مراکز جمع‌آوری خون دائمی تقاضای خون نماید و آن مراکز جمع‌آوری در استان معین آن بیمارستان واقع شده باشد. روابط (19 تا 21) مقدار موجودی خون با سنین متفاوت را در بیمارستان‌های منطقه‌ای نشان می‌دهد. روابط (22 تا 24) بیان می‌کنند جهت پاسخگویی به نیاز خون تازه در بیمارستان‌های منطقه‌ای، از خون‌هایی استفاده شود که ضمن سازگاری گروه گیرنده خون با گروه خون اهداکننده، حداکثر Tf دوره از عمر آنها گذشته باشد. روابط (25 و 26) نیز بیان می‌کند، ضمن تامین تقاضای خون در بیمارستان منطقه‌ای باید به سازگاری گروه‌های خونی توجه نمود. رابطه (27) تضمین می‌کند هریک از

بیمارستان‌های صحرایی دقیقاً به یک بیمارستان منطقه‌ای تخصیص می‌یابد. رابطه (28) تضمین می‌کند زمانی خون از بیمارستان منطقه‌ای به بیمارستان صحرایی انتقال می‌یابد که آن بیمارستان صحرایی به آن بیمارستان منطقه‌ای تخصیص داده شده باشد. روابط (29 تا 31) موجودی خون با سنین متفاوت را در بیمارستان صحرایی نشان می‌دهد. روابط (32 تا 34) نشان می‌دهند به‌منظور پاسخگویی به نیاز خون تازه در بیمارستان‌های صحرایی، از خون‌هایی استفاده شود که ضمن سازگاری گروه‌های خونی اهداکننده و گیرنده خون، حداکثر Tf دوره از عمر آنها گذشته باشد. روابط (35 و 36) نیز به این موضوع توجه دارد که ضمن سازگاری خون‌ها، تقاضای بیمارستان‌های صحرایی نیز باید تامین شوند. روابط (37 تا 41) بیان می‌کند تنها در صورتی خون بین نقاط مختلف اتفاق می‌افتد که ارتباطی بین گره‌ها شکل گرفته باشد. روابط (42 تا 44) تعداد وسایل حمل‌ونقل لازم جهت جابه‌جایی خون بین گره‌های مختلف را نشان می‌دهد. رابطه (45) نیز تضمین می‌کند تنها از وسایل حمل‌ونقلی برای طی مسیر بین بیمارستان‌های منطقه‌ای و بیمارستان‌های صحرایی استفاده شود که آن وسیله قابلیت طی کردن آن مسیر را داشته باشند. روابط (46 تا 48) نیز نشان می‌دهد سطح موجودی خون در هریک از مراکز دائم جمع‌آوری خون، بیمارستان‌های موقت و بیمارستان‌های صحرایی از ظرفیت آن مراکز بیشتر نگردد. روابط (49 تا 51) نیز وضعیت متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد.

۳-۲) روش‌های حل

برای حل در ابعاد کوچک، از روش میانگین‌وزنی و در ابعاد بزرگ، از دو الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و الگوریتم MOICA استفاده می‌شود.

۳-۲-۱) روش میانگین‌وزنی

میانگین‌وزنی یک روش محاسبه میانگین است که اهمیت یا وزن مخصوص هر داده را در نظر می‌گیرد. برای محاسبه میانگین‌وزنی از رابطه (52) استفاده شود که در آن w_i ها همان وزن است و باید عددی بین 0 تا 1 باشد بطوریکه مجموع وزن‌ها برابر با 1 شود.

$$\bar{x}_w = \sum w_i \times x_i \quad (52)$$

۳-۲-۲) Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II

الگوریتم NSGA-II یک الگوریتم چندهدفه است که توسط دب در سال ۲۰۰۲ با اضافه کردن دو عملگر به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه، ارائه شده است. کار این الگوریتم به شرح ذیل است:

- ۱) ایجاد جمعیت اولیه.
- ۲) محاسبه معیارهای برازندگی.
- ۳) مرتب کردن جمعیت براساس شرط‌های غلبه کردن.
- ۴) محاسبه فاصله ازدحامی.
- ۵) مرتب‌سازی جمعیت اولیه براساس شرط‌های غلبه‌سازی، محاسبه فاصله ازدحامی و انتخاب از میان جمعیت اولیه براساس رتبه جمعیت و فاصله ازدحامی.

- ۶) انجام Crossover و Mutation برای تولید فرزندان جدید.
- ۷) تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش.
- ۸) جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل.
- ۹) تکرار مراحل فوق تا رسیدن به شرط توقف.

در الگوریتم پیشنهادی برای عملکرد تقاطع، از روش دونقطه‌ای استفاده می‌شود. به گونه‌ای که ابتدا بطور تصادفی در فاصله بین والد ۱ و والد ۲، دو نقطه نظیر به نظیر انتخاب شود سپس فرزند هریک از والد‌ها مطابق شکل از دو نقطه انتخابی با یکدیگر جابجا شوند و سایر قسمت‌ها نیز ثابت می‌ماند. عمل جهش نیز برای فرار از به دام افتادن در بهینه محلی است که در اینجا دو نقطه انتخاب شده و سپس جابجا می‌شوند.

والد ۱	1	6	5	7	7	3	2	3
والد ۲	3	2	1	5	5	2	1	1

فرزند ۱	1	6	1	5	5	2	2	3
فرزند ۲	3	2	5	7	7	3	1	1

شکل ۲. نمونه‌ای از عملکرد تقاطع دو نقطه‌ای

۳-۲-۳ Multi-objective Imperialist Competitive Algorithm (MOICA)

الگوریتم رقابت استعماری یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است که نخستین بار در سال ۲۰۰۷ توسط آتشپز گری و لوکاس پیشنهاد شد و در آن فضای جواب‌ها توسط نقاطی به نام کشور مورد جستجو قرار می‌گیرد. بخشی از این کشورها تحت عنوان استعمارگر و برخی به عنوان کلونی‌های تحت سلطه استعمارگران عمل می‌کنند. قدم‌های این الگوریتم عبارتند از:

- قدم ۱: شکل‌دهی امپراطوری‌های اولیه.
- قدم ۲: حرکت کلونی‌ها به سمت استعمارگران.
- قدم ۳: تعویض موقعیت استعمارگر و کلونی.
- قدم ۴: محاسبه هزینه کل امپراطوری‌ها.
- قدم ۵: رقابت استعمارگران.
- قدم ۶: حذف امپراطوری‌های بی‌قدرت.

۳-۲-۴) چگونگی نمایش جواب

نمایش جواب مسئله مورد نظر دارای چند قسمت است. قسمت اول تخصیص (گرفتن سرویس) در هریک از قسمت‌های زنجیره تامین خون می‌باشد. بطور مثال در این قسمت مشخص می‌گردد که مرکز جمع‌آوری دائم از کدام مرکز جمع‌آوری موقت، خون دریافت می‌کند یا بیمارستان صحرایی از کدام بیمارستان منطقه‌ای می‌تواند سرویس دریافت کند یا بطور مشابه بیمارستان منطقه‌ای از کدام مرکز جمع‌آوری دائم خون امکان دریافت سرویس دارد و در نهایت اهداکنندگان خون باید به کدام مرکز جمع‌آوری موقت یا دائم خون مراجعه کنند. بطور مثال شکل ۳ نشان می‌دهد اگر چهار بیمارستان منطقه‌ای و پنج بیمارستان صحرایی داشته باشیم و با اعداد صحیح تصادفی ایجاد شده بین یک تا حداکثر تعدادی از آن سطح که موجود است، بیمارستان صحرایی سوم می‌تواند از بیمارستان منطقه‌ای چهارم سرویس دریافت کند. بطور مشابه، جواب‌های مربوط به تخصیص اهداکنندگان به مراکز دائم و موقت جمع‌آوری خون نیز بدینگونه مشخص می‌گردد.

بیمارستان صحرایی	۱	۲	۳	۴	۵
بیمارستان منطقه‌ای	۲	۱	۴	۳	۳

شکل ۳. ساختار نمایش جواب برای تخصیص (گرفتن) سرویس بیمارستان صحرایی از بیمارستان منطقه‌ای

برای نمایش جواب مربوط به ساختار موجودی، از آنجاکه خون در مراکز جمع‌آوری دائم و بیمارستان‌های منطقه‌ای، نگهداری و سپس براساس تقاضا ارسال می‌گردد، بردار جوابی مطابق شکل ۴ ایجاد شده است. به عنوان مثال: اگر سه مرکز جمع‌آوری دائم خون و چهار بیمارستان منطقه‌ای در سه دوره زمانی داشته باشیم، در وهله اول تقاضای آن دوره برطرف شده سپس تقاضای یک یا دو دوره دیگر نیز بررسی می‌شود.

تقاضا		مرکز جمع‌آوری	مرکز جمع‌آوری	مرکز جمع‌آوری	بیمارستان	بیمارستان	بیمارستان	بیمارستان
		دائم ۱	دائم ۲	دائم ۳	منطقه‌ای ۱	منطقه‌ای ۲	منطقه‌ای ۳	منطقه‌ای ۴
	t=1	0	1	1	0	0	2	0
	t=2	0	0	1	1	2	0	0
	t=3	0	0	1	0	0	1	0

شکل ۴. ساختار نمایش جواب برای میزان مدیریت موجودی براساس میزان تقاضا

برای نشان دادن اولویت گرفتن خون براساس سازگاری گروه‌های خونی از بردار استفاده می‌گردد. نکته حائز اهمیت این است که با توجه به اینکه گروه خونی O- فقط می‌تواند از O- خون دریافت کند ولی می‌تواند به همه گروه‌های خونی، خون اهدا کند، به همین دلیل نیاز است که برای سایر گروه‌های خونی اولویت‌بندی استفاده از گروه‌های خونی صورت گیرد تا با کمبود برای گروه‌های خونی کمیاب مواجه نشویم. با توجه به اطلاعات جدول ۲، هشت گروه خونی مدنظر است و هر فرد اهداکننده ممکن است یکی از این ۸ گروه را بطور تصادفی داشته باشد. بطور مثال: از بین شش اهداکننده شکل ۵،

اهداکندگان یک و شش دارای گروه خونی AB+ (کد 8) که می‌تواند در یکی از مراکز جمع‌آوری دائم یا موقت از او خون گرفته شود.

اهداکنده	1	2	3	4	5	6
دریافت خون براساس شماره گروه خون	8	1	3	4	6	8

شکل ۵. ساختار نمایش جواب دریافت خون براساس اولویت گروه‌های خونی

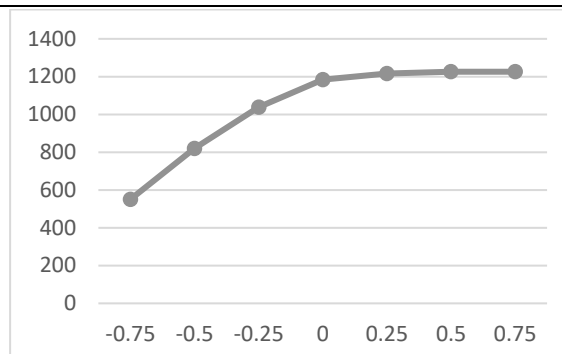
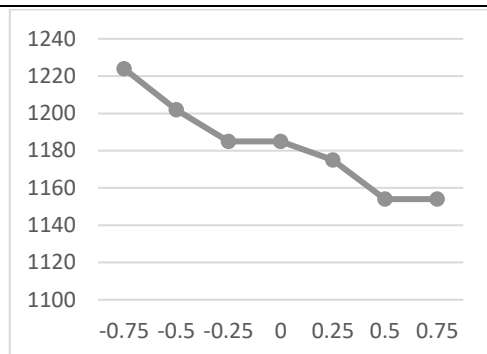
همانطور که اشاره شد حمل و نقل با دو نوع وسیله نقلیه آمبولانس (شماره ۱) یا هلیکوپتر (شماره ۲) از مراکز جمع‌آوری دائم خون به بیمارستان منطقه‌ای و از بیمارستان منطقه‌ای به بیمارستان صحرایی صورت می‌گیرد. برای مثال در شکل ۶ چنانچه چهار بیمارستان منطقه‌ای و پنج بیمارستان صحرایی داشته باشیم، بیمارستان منطقه‌ای ۲ به کمک هلیکوپتر و بیمارستان صحرایی ۴ به کمک آمبولانس، خون دریافت می‌کنند.

	بیمارستان صحرایی	بیمارستان صحرایی	بیمارستان صحرایی	بیمارستان صحرایی	بیمارستان منطقه‌ای	بیمارستان منطقه‌ای	بیمارستان منطقه‌ای	بیمارستان منطقه‌ای	بیمارستان منطقه‌ای
	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۱
وسیله نقلیه	1	1	2	2	1	2	1	2	1

شکل ۶. ساختار نمایش جواب برای تخصیص نوع وسیله نقلیه

(۴) یافته‌ها

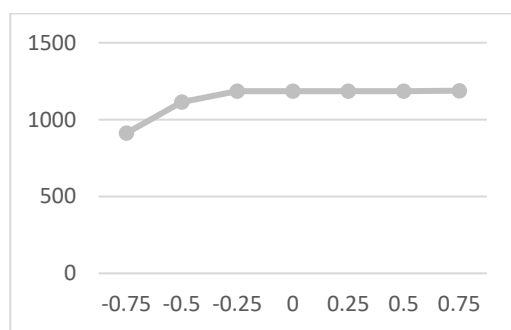
برای حل این مدل در ابعاد کوچک، از روش میانگین‌وزنی و برای ابعاد بزرگ، از الگوریتم‌های NSGA-II و MOICA استفاده می‌کنیم. اما پیش از هر چیز و به منظور اعتبارسنجی مدل یک مثال عددی در ابعاد بسیار کوچک شامل پنج اهداکنده، سه مرکز جمع‌آوری موقت خون، چهار مرکز جمع‌آوری دائم خون، چهار بیمارستان منطقه‌ای و چهار بیمارستان صحرایی، سن خون برابر با پنج روز، سن خون تازه برابر با سه روز، تعداد گروه‌های خونی برابر با دو گروه خونی، دو نوع وسیله نقلیه و سه دوره در نظر گرفته شده است. با حل مدل توسط CPLEX، مقادیر سه هدف اول تا سوم به ترتیب برابر با ۱۱۲۷، ۵۲ و ۱۱۵۲۰ در مدت زمان حل حدوداً ۲۴ ثانیه به دست آمد و به منظور بررسی دقیق‌تر تحلیل حساسیتی روی پنج پارامتر هزینه نگهداری خون در بیمارستان صحرایی، ظرفیت وسیله‌های نقلیه، هزینه تشویق، شعاع پوشش و متوسط قابلیت اطمینان در بازه تغییرات منفی ۷۵ درصد تا ۷۵ درصد انجام گرفت. بطور مثال: شکل ۶ نشان می‌دهد با افزایش ظرفیت وسیله نقلیه، تابع هزینه، کاهش و با کاهش ظرفیت وسیله نقلیه، این مقدار افزایش می‌یابد. چراکه با کاهش ظرفیت، از صفر درصد تغییر به ۷۵-۲۵ درصد تغییر، نیاز به تعداد وسایل نقلیه و یا میزان تردها بیشتر شده و می‌تواند هزینه‌های کل را از ۱۱۸۵ به ۱۲۲۴ افزایش دهد. بطور مشابه، با افزایش ظرفیت وسایل نقلیه از صفر درصد تا ۷۵ درصد، میزان تردها و یا تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز کاهش می‌یابد و در نتیجه هزینه‌ها کم می‌شود. شکل ۷ تحلیل حساسیت هزینه نگهداری خون در بیمارستان صحرایی را نشان می‌دهد. هرچقدر این هزینه بیشتر شود، تابع هدف بیشتر و هرچقدر این هزینه کمتر شود، تابع هدف کمتر می‌شود.



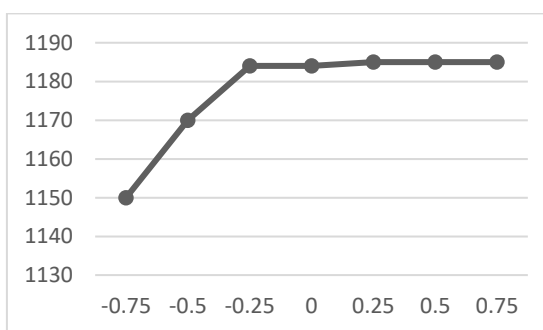
شکل ۶. تاثیر تغییرات ظرفیت وسیله نقلیه روی تابع هزینه

شکل ۷. تاثیر پارامتر هزینه نگهداری بیمارستان صحرائی

تحلیل حساسیت هزینه تشویق (شکل ۸) نشان می‌دهد، هرچه قدر هزینه تشویق بالاتر رود، هزینه کل نیز افزایش می‌یابد. شکل ۹ نیز مربوط به شعاع پوشش است و نشان می‌دهد با افزایش شعاع پوشش، هزینه‌های کل افزایش می‌یابد.



شکل ۸. تحلیل حساسیت پارامتر هزینه تشویق



شکل ۹. تحلیل حساسیت پارامتر شعاع پوشش

سیستم کامپیوتری مورد استفاده برای حل مسئله با ابعاد کوچک نرم‌افزار GAMS، Intel(R) Core(TM) i5-3230M CPU، و سیستم عامل Microsoft Windows 10 است.

۴-۱) استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOICA برای حل مسئله

شکی نیست که در استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها می‌تواند در دقت و سرعت پاسخ‌ها تاثیرگذار باشد. در این میان، روش تاگوچی یکی از محبوب‌ترین روش‌ها برای عملکرد بهتر الگوریتم‌هاست. این روش اثرات تنظیم پارامترهای مختلف را بر روی خروجی الگوریتم اندازه‌گیری می‌کند و ترکیب مناسب پارامترها را برای به حداقل رساندن تغییرات و افزایش کیفیت الگوریتم انتخاب می‌کند. روش تاگوچی جهت مطالعه گروهی از عامل‌ها بر پایه آرایه‌های متعامد است. عامل‌های استفاده‌شده در روش تاگوچی را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم نمود: عامل‌های قابل کنترل (S) و عامل‌های اختلالی (N). سپس یک متغیر S/N تعریف می‌شود که نسبت سیگنال به اختلال را نشان می‌دهد. روش تاگوچی دو مزیت مهم دارد: اول آنکه نیازی به بررسی تمام آزمایشات ممکن برای عوامل ندارد و تنها کسر مشخصی از آزمایشات را بررسی می‌کند و دوم آنکه از کسر بررسی‌شده، مقدار مناسبی اطلاعات استخراج می‌کند و با استفاده از اطلاعاتی نسبتاً خوب، تنظیم عوامل را انجام می‌دهد. با این حال، مقایسه الگوریتم‌های تک‌هدفه را می‌توان به راحتی با

استفاده از مقدار تابع هدف انجام داد درحالیکه الگوریتم‌های چندهدفه به جای یک راه حل واحد، مجموعه‌ای از راه حل‌های پارتو دارند. بنابراین لازم است معیارهایی برای تسهیل مقایسه الگوریتم‌های چندهدفه معرفی شوند که در این پژوهش از پنج معیار زیر برای این کار استفاده می‌شود:

(۱) Number of non-dominated Pareto solutions (NOS): یکی از معیارهای ارزیابی الگوریتم‌ها، تعداد راه حل‌های پارتو غیرغالب تولیدشده توسط الگوریتم‌هاست. براساس این معیار، الگوریتمی که دارای NOS بالاتری باشد، الگوریتم مناسب‌تری است.

(۲) Quality Metric (QM): این شاخص با ترکیب راه حل‌های غیرغالب یک الگوریتم با راه حل‌های پارتو از روش‌های دیگر، تعیین می‌کند چند درصد از راه حل‌ها بدون تسلط باقی می‌مانند. مقدار بالاتر این شاخص عملکرد بهتر را نشان می‌دهد.

(۳) Mean Ideal Distance (MID): این شاخص میانگین فاصله بین مجموعه‌ای از راه حل‌ها و نقطه ایده‌آل را اندازه‌گیری می‌کند. بهترین پاسخ برای هر هدف، نقطه ایده‌آل نامیده می‌شود. بطور کلی هرچه MID کوچکتر باشد، راه حل‌ها به نقطه ایده‌آل نزدیک‌تر هستند. برای محاسبه این شاخص از رابطه (۵۳) استفاده می‌شود که در آن n تعداد جواب‌های پارتو، m تعداد توابع هدف، f_{ij} مقدار تابع هدف i ام از i مین راه حل پارتو است. f_j^* مقدار ایده‌آل تابع هدف j امین و f_j^{max} f_j^{min} به ترتیب، حداقل و حداکثر مقدار تابع هدف j در مجموعه راه حل‌های پارتو است (zitzi و همکاران، ۲۰۰۳).

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{f_{ij} - f_j^*}{f_j^{max} - f_j^{min}} \right)^2}}{n} \quad (53)$$

(۴) Diversity Measures (DM): فاصله بین دورترین نقاط پارتو با استفاده از این شاخص محاسبه می‌شود. رابطه (۵۴) که در آن m به تعداد اهداف، f_j^{max} و f_j^{min} به ترتیب، حداقل و حداکثر تابع هدف j در مجموعه راه حل‌های پارتو است. (Deb و همکاران، ۲۰۱۶). مقادیر بالاتر DM، نشان‌دهنده تنوع گسترده راه حل‌هاست.

$$DM = \sqrt{\sum_{j=1}^m (f_j^{max} - f_j^{min})^2} \quad (54)$$

(۵) زمان محاسباتی: این معیار نشان‌دهنده سرعت عملکرد الگوریتم می‌باشد و بدیهی است که هرچه این مقدار کمتر باشد، الگوریتم بهتر است.

برای تنظیم شش پارامتر، الگوریتم MOICA و چهار پارامتر، الگوریتم NSGA-II از سطوح ارائه‌شده جدول ۳ و برای انتخاب سطوح، از شاخص SN روش تاگوچی که هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد بهتر خواهد بود، کمک گرفته شده‌است.

جدول ۳. سطوح موردنظر برای الگوریتم‌های MOICA و NSGA-II

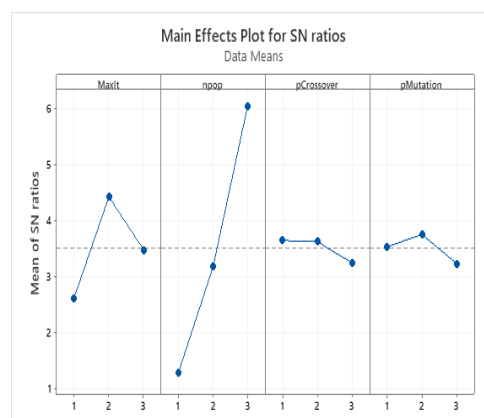
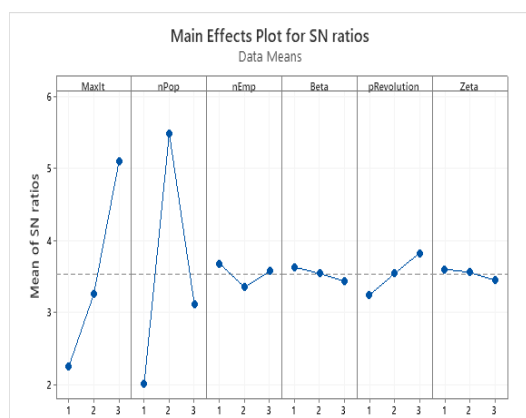
الگوریتم	MOICA						NSGA-II			
پارامتر	MaxIt	nPop	nEmp	β	pRevolution	ζ	MaxIt	nPop	pCrossover	pMutation
شرح	تعداد تکرار	اندازه جمعیت	تعداد امپریالیست‌ها	ضریب جذب	احتمال انقلاب	میانگین ضریب هزینه مستعمرات	تعداد تکرار	اندازه جمعیت	نرخ تقاطع	نرخ جهش
سطح پایین	100	100	10	0.2	0.1	0.1	100	100	0.8	0.1
سطح متوسط	200	150	12	0.25	0.15	0.15	200	150	0.85	0.15
سطح بالا	300	200	15	0.3	0.2	0.2	300	200	0.9	0.2

با توجه به چندهدفه بودن الگوریتم‌های بکاررفته، از روش میانگین موزون شاخص‌ها استفاده می‌شود اما با توجه به مقیاس‌های مختلف این شاخص‌ها، نیاز به بی‌مقیاس‌سازی و سپس وزن‌دار کردن آنها می‌شود. از آنجاییکه برخی از معیارها، مثبت (مقادیر بزرگتر بهتر مانند معیارهای تعداد راه‌حل‌های پارتو غیرغالب، کیفیت و تنوع) و برخی از معیارها، منفی (مقادیر کوچکتر بهتر مانند میانگین فاصله ایده‌آل و زمان) می‌باشند، از عبارات (55) و (56) برای نرمال‌سازی شاخص‌های مثبت و منفی استفاده شده است. سپس وزن‌های 0.1 برای هریک از معیارهای تعداد راه‌حل‌های پارتو غیرغالب و زمان، وزن 0.3 برای معیارهای میانگین فاصله ایده‌آل و کیفیت و 0.2 برای معیار تنوع استفاده می‌شود.

$$n_{ij}^{new} = \frac{n_{ij} - n_j^{min}}{n_j^{max} - n_j^{min}} \quad (55)$$

$$n_{ij}^{new} = \frac{n_j^{max} - n_{ij}}{n_j^{max} - n_j^{min}} \quad (56)$$

نتایج حاصل از روش تاگوشی برای دو الگوریتم MOICA و NSGA-II در دو شکل ۱۰ و ۱۱ آورده شده است و نتایج نهایی تنظیم پارامترها در جدول ۴ منعکس شده است.



شکل ۱۰. نتایج شاخص SN در تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA-II

شکل ۱۱. نتایج شاخص SN در تنظیم پارامترهای الگوریتم MOICA

جدول ۴. نتایج نهایی پارامترهای انتخاب شده در الگوریتم‌ها

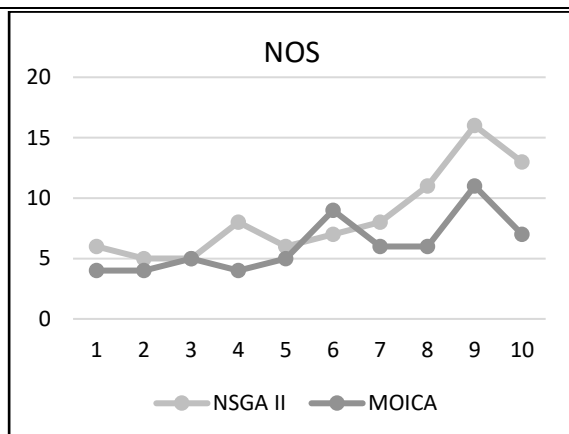
MOICA							NSGA-II			
پارامتر	MaxIt	nPop	NEmp	β	$pRevolution$	ζ	MaxIt	NPop	pCrossover	pMutation
سطوح نهایی	300	150	10	0.2	0.2	0.1	200	200	0.8	0.15

در این قسمت، الگوریتم‌های موردنظر با استفاده از شاخص‌های معرفی شده، باهم مقایسه می‌شوند. شایان ذکر است که برای این کار از داده‌های مطالعه موردی زلزله کرمانشاه که در مقاله پورآذری و همکاران (2020) منتشر گردیده، کمک گرفته شده‌است. برخی از داده‌ها هم که امکان دسترسی به آنها وجود نداشت، بطور تصادفی تولید گردیده‌اند.

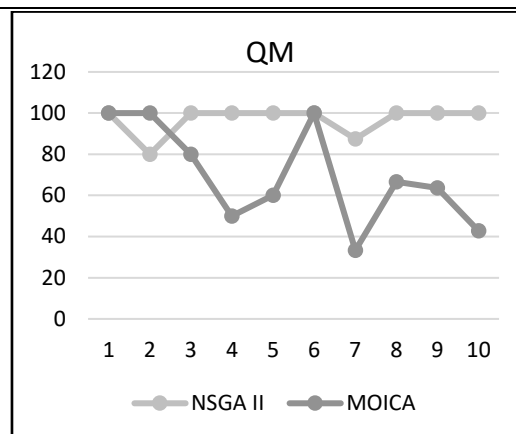
جدول ۵. ابعاد مسائل استفاده شده در فراابتکاری‌ها

مسئله	ابعاد مسئله						تعداد دوره
	تعداد اهداکنندگان خون	مراکز جمع‌آوری موقت خون	مراکز دائم جمع‌آوری دائم خون	بیمارستان منطقه‌ای	بیمارستان صحرایی	تعداد گروه‌های خونی	
1	2	2	2	2	2	8	3
2	3	3	2	3	3	8	3
3	3	3	3	3	3	8	3
4	3	2	3	5	5	8	3
5	3	3	3	6	6	8	3
6	3	3	3	8	8	8	3
7	4	4	3	7	7	8	3
8	5	4	4	8	8	8	3
9	5	4	4	9	9	8	3
10	5	4	4	10	10	8	3

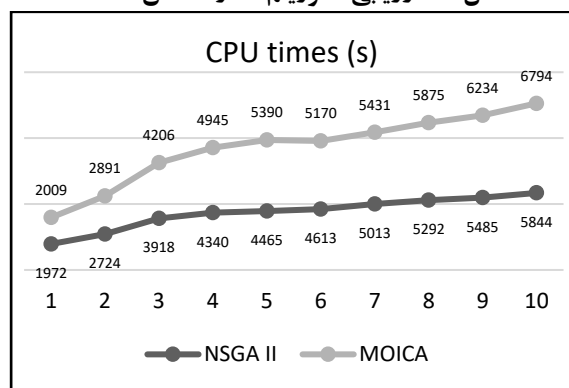
مقایسات دو الگوریتم در شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ ارائه شده‌است. شکل ۱۲ نشان می‌دهد در اکثر مواقع شاخص الگوریتم NSGA-II نسبت به الگوریتم MOICA از منظر تعداد نقاط جواب‌های پارتو بهتر عمل کرده‌است. شکل ۱۳ بیان می‌کند در اکثر قریب به اتفاق مسائل، میزان QM الگوریتم NSGA-II از الگوریتم MOICA بهتر است. شکل ۱۴ نیز نشان می‌دهد، اولاً: شاخص CPU times در هر 10 مسئله به علت بزرگ شدن ابعاد مسئله حالت صعودی دارد و ثانیاً الگوریتم NSGA-II در زمان سریعتری، به پاسخ می‌رسد. معیار تنوع یا شاخص DM در شکل ۱۵ بررسی شده‌است که نشان می‌دهد الگوریتم MOICA نسبت به الگوریتم NSGA-II تنوع بیشتر و بهتری دارد. در نهایت شکل ۱۶ بیان می‌کند الگوریتم NSGA-II نسبت به الگوریتم MOICA دارای شاخص MID کمتری است و در نتیجه موثرتر عمل می‌کند. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از تمام این مقایسات می‌توان دریافت که در اکثر مواقع الگوریتم NSGA-II نتایج بهتری نسبت به الگوریتم MOICA ارائه نموده‌است.



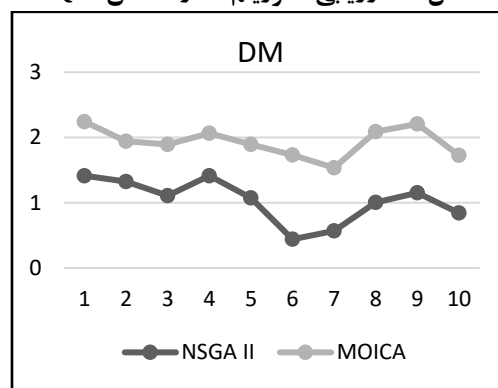
شکل ۱۲. ارزیابی الگوریتم‌ها در شاخص NOS



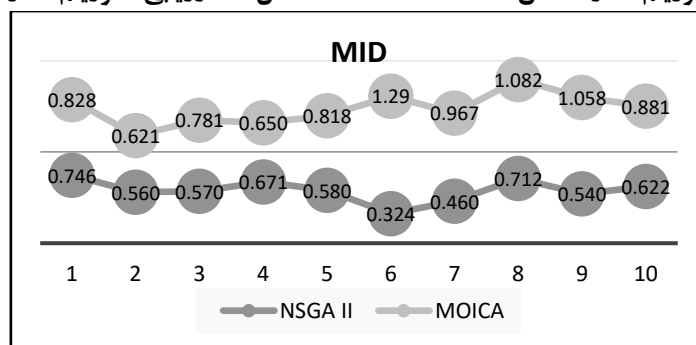
شکل ۱۳. ارزیابی الگوریتم‌ها در شاخص QM



شکل ۱۴. ارزیابی الگوریتم‌ها در شاخص زمان حل



شکل ۱۵. ارزیابی الگوریتم‌ها در شاخص DM



شکل ۱۶. ارزیابی الگوریتم‌ها در شاخص MID

۵) نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق، به طراحی شبکه زنجیره تامین خون برای شرایط پس از بحران با توجه به قابلیت اطمینان، استفاده از شبکه ملی خون‌رسانی، سازگاری گروه‌های خونی و سیاست تشویق که یک مسئله بسیار حیاتی و پیچیده است، پرداخته شد. قابلیت اطمینان از منظر پایداری و عملکرد صحیح شبکه زنجیره تامین خون در شرایط بحران بسیار اهمیت دارد. همچنین تشکیل یک شبکه ملی خون‌رسانی که تامین، نگهداری و توزیع خون را از طریق مناطق مختلف کشور فراهم کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. در طراحی شبکه، باید به سازگاری گروه‌های خونی توجه داشته باشیم چراکه امکان تزریق خون از هر گروه خونی به هر گروه خونی دیگر وجود ندارد. از طرفی، تشویق برای اهدای خون و همچنین ایجاد مراکز

جمع آوری و نگهداری خون از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به تحقیقات گذشته، می توان به این نتیجه رسید که تابع هدف مشترک در بیشتر مقالات و مطالعاتی که بررسی شده، تابع هدف حداقل کردن هزینه های کلی شبکه بوده است اما اهدافی چون بالابردن قابلیت اطمینان یا اولویت دهی خون رسانی، کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته بود. به همین دلیل در این تحقیق علاوه بر هدف کاهش هزینه، دو هدف بالابردن قابلیت اطمینان و کاهش اولویت دهی خون رسانی از خون های ناباب (نظیر گروه خونی O-) به سایر گروه های خونی، مورد توجه قرار گرفته است. در این زمینه یک مدل ریاضی توسعه داده شد که اعتبارسنجی در مسئله ای با ابعاد کوچک GAMS نشان داده شد. با بررسی مقالات، مشخص گردید از نظر روش حل، مقالات کمی هستند و از روش های فراابتکاری برای حل کمک گرفته اند و بیشتر آنها روی روش های دقیق برای حل، تمرکز داشتند. این در حالی است که روش های حل دقیق در حل مسائل با ابعاد بزرگ، کارآمدی مناسبی به ویژه از منظر زمان حل برای شرایط بحران که زمان در آن بسیار تعیین کننده است، ندارند. به همین علت در این تحقیق، از الگوریتم های فراابتکاری NSGA-II و MOICA در روند حل مسائل با ابعاد بزرگ استفاده شده است. برای مقایسه الگوریتم ها نیز از ۵ شاخص فاصله از ایده آل، کیفیت، تنوع، زمان حل و تعداد نقاط لایه پارتو استفاده شد. پس از مقایسات صورت گرفته و همچنین تنظیم پارامتر به روش تاگوجی، به این نتیجه رسیدیم که الگوریتم NSGA-II برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین خون برای شرایط پس از بحران، با توجه به قابلیت اطمینان، استفاده از شبکه ملی خون رسانی، سازگاری گروه های خونی و سیاست تشویق، نسبت به الگوریتم MOICA عملکرد بهتری داشته است.

از محدودیت های این تحقیق می توان به این موضوع اشاره کرد که علیرغم تلاش صورت گرفته برخی از داده ها در سامانه های سازمان ها در دسترس نبودند و مجبور بودیم برای این دسته از داده ها از اعداد تصادفی استفاده کنیم. در رابطه با مسئله بررسی شده در این پژوهش، پیشنهادهای در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی زنجیره تامین خون، ترکیب مسئله با زمان بندی و مسیریابی جهت کاهش زمان تحویل خون و منظور نمودن فرآورده های خونی از جمله پلاسما، پلاکت و استفاده از سیستم های صف در اهدا و خدمت رسانی برای حل مسئله پیشنهاد می گردد. علاوه بر این، وارد کردن عدم قطعیت در شرایط اهدا، زمان اهدا، زمان رسیدن خون به نقاط سانحه دیده، تقاضا و میزان اهدا می تواند از مواردی باشد که می تواند برای محققین به ویژه برای شرایط پس از بحران جذابیت داشته باشد.

منابع

- Arani, M., Momenitabar, M., Ebrahimi, Z. D., & Liu, X. (2021). A Two-Stage Stochastic Programming Model for Blood Supply Chain Management, Considering Facility Disruption and Service Level. arXiv preprint arXiv:2111.02808. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.02808>
- Arani, M., Chan, Y., Liu, X., & Momenitabar, M. (2021). A lateral resupply blood supply chain network design under uncertainties. *Applied mathematical modelling*, 93, 165-187. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.010>
- Behroozi, F., Monfared, M. A. S., & Hosseini, S. M. H. (2021). Investigating the conflicts between different stakeholders' preferences in a blood supply chain at emergencies: a trade-off between six objectives. *Soft Computing*, 25(21), 13389-13410. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06157-7>
- Deb, K., Sindhya, K., & Hakanen, J. (2016). Multi-objective optimization. In *Decision sciences* (pp. 161-200). CRC Press.
- Fahmihassan, A., Moghari, M., & Ebadati, O. (2020). Prediction of Blood Donations Using Data Mining Based on the Decision Tree Algorithms KNN, SVM, and MLP. *Engineering Management and Soft Computing*, 6(1), 109-129. [doi: 10.22091/jemsc.2018.1278](https://doi.org/10.22091/jemsc.2018.1278)
- Farrokhizadeh, E., Seyfi-Shishavan, S. A., & Satoglu, S. I. (2022). Blood supply planning during natural disasters under uncertainty: a novel bi-objective model and an application for red crescent. *Annals of Operations Research*, 319(1), 73-113. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-03978-5>

- Farshidi, Y., Ghasemi, R., & Sharafian Ardekani, A. (2022). Designing a Neural Observer to Estimate the State Variables of the Dynamical System of a Specific Class of Leukaemia. *Engineering Management and Soft Computing*, 7(2), 124-144. doi: 10.22091/jemsc.2018.1000.1041
- Fazli-Khalaf, M., Khalilpourazari, S., & Mohammadi, M. (2019). Mixed robust possibilistic flexible chance constraint optimization model for emergency blood supply chain network design. *Annals of operations research*, 283, 1079-1109. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2729-3>
- Ghorashi, S. B., Hamed, M., & Sadeghian, R. (2020). Modeling and optimization of a reliable blood supply chain network in crisis considering blood compatibility using MOGWO. *Neural computing and applications*, 32, 12173-12200. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04343-1>
- Hosseini, S. M. H., Behroozi, F., & Sana, S. S. (2023). Multi-objective optimization model for blood supply chain network design considering cost of shortage and substitution in disaster. *RAIRO-Operations Research*, 57(1), 59-85. <https://doi.org/10.1051/ro/2022206>
- Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Homaei, S. (2020). Blood supply chain management: robust optimization, disruption risk, and blood group compatibility (a real-life case). *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11, 1085-1104. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01315-0>
- Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Cheraghi, S. (2020). Robust and stable flexible blood supply chain network design under motivational initiatives. *Socio-economic planning sciences*, 70, 100725. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2019.07.001>
- Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Homaei, S. (2020). Toward a coordination of inventory and distribution schedules for blood in disasters. *Socio-Economic Planning Sciences*, 72, 100897. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100897>
- Khalilpourazari, S., & Arshadi Khamseh, A. (2019). Bi-objective emergency blood supply chain network design in earthquake considering earthquake magnitude: a comprehensive study with real world application. *Annals of Operations Research*, 283, 355-393. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2588-y>
- Khalilpourazari, S., Soltanzadeh, S., Weber, G. W., & Roy, S. K. (2020). Designing an efficient blood supply chain network in crisis: neural learning, optimization and case study. *Annals of Operations Research*, 289, 123-152. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03437-2>
- Moslemi, S., & Pasandideh, S. H. R. (2021). A location-allocation model for quality-based blood supply chain under IER uncertainty. *RAIRO-operations research*, 55, S967-S998. <https://doi.org/10.1051/ro/2020035>
- Namazian, A. and Babazadeh, R. (2025). Designing supply chain of blood under uncertainty: A case study. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 14(1), 177-195. doi: 10.22105/riiej.2024.436665.1415
- Nahofti Kohne, J., Derikvand, H., Amirdadi, M., & Teimoury, E. (2023). A blood supply chain network design with interconnected and motivational strategies: A case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(7), 8249-8269. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03594-y>
- Rashidzadeh, E., Hadji Molana, S. M., Soltani, R., & Hafezalkotob, A. (2021). Assessing the sustainability of using drone technology for last-mile delivery in a blood supply chain. *Journal of Modelling in Management*, 16(4), 1376-1402. <https://doi.org/10.1108/JM2-09-2020-0241>
- Rezaei Kallaj, M., Abolghasemian, M., Moradi Pirbalouti, S., Sabk Ara, M., & Pourghader Chobar, A. (2021). Vehicle routing problem in relief supply under a crisis condition considering blood types. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/7217182>
- Razavi, N., Gholizadeh, H., Nayeri, S., & Ashrafi, T. A. (2021). A robust optimization model of the field hospitals in the sustainable blood supply chain in crisis logistics. *Journal of the Operational Research Society*, 72(12), 2804-2828. <https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1821586>
- Salehi, F., Mahootchi, M., & Hussein, S. M. M. (2019). Developing a robust stochastic model for designing a blood supply chain network in a crisis: a possible earthquake in Tehran. *Annals of operations research*, 283, 679-703. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2533-0>
- Samani, M. R. G., & Hosseini-Motlagh, S. M. (2019). An enhanced procedure for managing blood supply chain under disruptions and uncertainties. *Annals of Operations Research*, 283(1-2), 1413-1462. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2873-4>
- Seyfi-Shishavan, S. A., Donyatalab, Y., Farrokhzadeh, E., & Satoglu, S. I. (2023). A fuzzy optimization model for designing an efficient blood supply chain network under uncertainty and disruption. *Annals of operations research*, 331(1), 447-501. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04123-y>
- Yang, H., Yin, Y., Wang, D., Cheng, T. C. E., Zhang, R., & Hu, H. (2024). An integrated blood supply chain network design during a pandemic. *International Journal of Production Research*, 63(9), 3384-3409. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2396511>
- Yousefi Nejad, M., Khayat Rasouli, M., & Khalilpour, Z. (2022). Optimizing Red Blood Cell Consumption Using Markov's Decision-Making Process (Case study: Blood Bank of Zanjan Province Blood Transfusion Center). *Engineering Management and Soft Computing*, 8(1), 71-84. doi: 10.22091/jemsc.2019.1296
- Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M., Fonseca, C. M., & Da Fonseca, V. G. (2003). Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 7(2), 117-132. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2003.810758>